



Vasco Fernando Rodrigues Caetano

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Análise multicritério aplicada na reabilitação de infraestruturas ferroviárias

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientadora: Doutora Paula M. C. M. Couto, Investigadora Auxiliar, LNEC

Coorientadora: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor José N. Varandas, Professor Auxiliar, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova
de Lisboa

Arguente: Doutora Zuzana Dimitrovová, Professora Auxiliar, Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Vogal: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro, 2018

Análise multicritério aplicada na reabilitação de infraestruturas ferroviária

Copyright © Vasco Fernando Rodrigues Caetano, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família ...

“The road to success is always under construction.”

Arnold Palmer

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação marca uma relevante etapa da minha vida e gostaria de expressar uma palavra de apreço a todos os que de uma forma decisiva me apoiaram e que, de algum modo, contribuíram para a elaboração deste trabalho. O concretizar desta etapa foi muito importante para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

O presente trabalho de tese foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), mais especificamente, com o apoio do Departamento de Edifícios, sob a orientação da Doutora Paula Couto, e do Departamento de Transportes, sob coorientação da Professora Doutora Simona Fontul. Devo desde já um agradecimento especial a esta entidade por me ter proporcionado a oportunidade de estagiar nas suas instalações e pelo fornecimento de todas as condições necessárias à realização deste trabalho.

Aproveito também para expressar o meu agradecimento a todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, por todo o conhecimento transmitido e por contribuírem para ser um melhor profissional.

Um enorme obrigado à Doutora Paula Couto por toda a disponibilidade, partilha de conhecimentos, apoio na superação dos diversos obstáculos e constantes sugestões, correções e críticas construtivas.

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão à Professora Doutora Simona Fontul, por acreditar nas minhas capacidades e ter aceitado este desafio, por todas as ideias de trabalho que surgiram ao longo das nossas conversas e pela total disponibilidade. De realçar o seu incentivo, dedicação e confiança transmitidos ao longo desta etapa, acompanhados de amizade e de uma boa disposição. Neste sentido, foi um privilégio ter sido seu orientando.

Agradeço a disponibilidade, envolvimento e contribuição técnica que a Doutora Maria João Falcão acrescentou a esta dissertação. Obrigado pela sua participação.

À minha colega, Sara, por ter partilhado esta “viagem” de 5 anos comigo, por ter estado literalmente ao meu lado, pela paciência e luta constante.

À Eng^a. Anaíza por toda a envolvimento e apoio constante ao longo desta etapa.

Aos meus pais, mãe Isabel e pai Fernando, pela oportunidade, pelos sacrifícios e por me inculcaram a realização profissional e a necessidade de aprender constantemente mais, como alguns valores que regem a minha vida.

A todos os colegas e amigos que me marcaram durante todo o meu percurso académico e que de uma forma ou de outra me ajudaram a ultrapassar alguns dos obstáculos.

Resumo

A infraestrutura ferroviária apresenta condicionantes muito próprias que conduzem à necessidade de otimização da infraestrutura, com elevados níveis de segurança e qualidade, associados a um custo mais vantajoso. Neste sentido, afigura-se imprescindível compreender *à priori* as metodologias de inspeção e monitorização das infraestruturas existentes, a forma de processamento dos seus dados, bem como as soluções de reabilitação disponíveis no mercado.

O presente trabalho tem início com uma breve descrição dos: i) constituintes da via balastrada e o seu funcionamento; ii) diferentes tipos de ações atuantes; iii) mecanismos de degradação a nível da camada de balastro, da subestrutura e das zonas de transição. As soluções de reabilitação abordadas neste trabalho contemplam desde um simples ataque da via, até a uma renovação integral da via com reforço da subestrutura. Tendo por base alguns dos conceitos apresentados no que se refere à Análise Multicritério, torna-se possível definir quais as variáveis, critérios e respetivos pesos, que mais importam e condicionam a decisão de investimento na reabilitação da infraestrutura ferroviária. Atualmente, o fator económico surge como uma das variáveis que apresenta elevado peso de decisão devido a encontrar-se fortemente associado a uma falta de capacidade de investimento. A ausência de medidas de manutenção e de reabilitação tem um impacto negativo a nível da qualidade de serviço prestado aos utilizadores, da própria infraestrutura e do material circulante, resultando em custos de reabilitação maiores. Posteriormente, é apresentado um caso de estudo correspondente a um trecho de uma infraestrutura ferroviária em Portugal, onde será aplicada toda a metodologia da Análise Multicritério e consequente análise de resultados.

O trabalho desenvolvido constitui um importante contributo para um planeamento mais eficiente das medidas de manutenção e reabilitação ferroviária, baseando-se num melhor aproveitamento dos dados resultantes do plano de monitorização, mediante uma análise multicritério.

Palavras-chave: Via-férrea balastrada; Análise multicritério; MACBETH; Singularidades da via-férrea; Zonas de transição; Degradação da via-férrea; Monitorização da via-férrea; Métodos de reabilitação e de manutenção.

Abstract

The railway infrastructure has very specific constraints that lead to the need to optimize the infrastructure, with high levels of safety and quality, associated with a more cost-effective maintenance. In this sense, it seems essential to understand *à priori* the methodologies of inspection and monitoring of existing infrastructures, the way of processing their data, as well as the rehabilitation solutions available in the market.

The present work begins with a brief description of: i) components of the ballasted track and its operation; ii) different types of acting actions; iii) degradation mechanisms at the ballast layer, substructure and transition zones. The rehabilitation solutions addressed in this work range from ballast tamping to an integral renewal of the infrastructure with reinforcement of the substructure. Based on some of the concepts presented in Multi-criteria Analysis, it is possible to define which variables, criteria and respective weights, are most important and condition the investment decision in the rehabilitation of the railway infrastructure. Currently, the economic factor appears as one of the variables that present a high decision weight due to its strong association with a lack of investment capacity. The lack of maintenance and rehabilitation measures has a negative impact on the quality of service provided to users, on the infrastructure itself and on rolling stock, resulting in higher rehabilitation costs. Subsequently, a case study is presented, corresponding to a section of an in service railway infrastructure in Portugal, where the entire Multi-criteria methodology is applied and consequently analysed.

The work contributes to a more efficient planning of railway maintenance and rehabilitation measures, based on a better use of the data resulting from the monitoring plan, through a multi-criteria analysis.

Keywords: Railway track; Ballasted track; Multi-criteria analysis; MACBETH; Railway singularities; Transition zones; Track degradation; Railway monitoring; Rehabilitation and maintenance methodologies.

Índice de Texto

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. METODOLOGIA	3
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS BALASTRADAS.....	5
2.1. CONSTITUIÇÃO DA VIA.....	5
2.2. ZONAS DE TRANSIÇÃO.....	12
2.3. AÇÕES	14
2.4. DEGRADAÇÃO DA VIA	15
2.4.1. DEGRADAÇÃO DA CAMADA DE BALASTRO.....	17
2.4.2. DEGRADAÇÃO DA SUBESTRUTURA.....	18
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
3. METODOLOGIAS DE APOIO À DECISÃO	21
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
3.2. CONCEITOS BASE DA TEORIA DA DECISÃO	22
3.3. ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO	24
3.4. ANÁLISE MULTICRITÉRIO	26
3.5. MACBETH	30
3.6. COMPARAÇÃO ENTRE AHP E MACBETH	34
3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
4. MONITORIZAÇÃO E REABILITAÇÃO	37
4.1. ENTIDADE GESTORA DA REDE FERROVIÁRIA NACIONAL, SUA ORGANIZAÇÃO, GESTÃO E ATUAÇÃO	39
4.2. INSPEÇÃO E MONITORIZAÇÃO DA VIA	41
4.2.1. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA VIA.....	43
4.2.2. VEÍCULO DE INSPEÇÃO DE VIA - EM 120.....	47
4.3. PROCESSAMENTO DE DADOS.....	54
4.4. MEDIDAS DE REABILITAÇÃO APLICÁVEIS AO CASO DE ESTUDO.....	55
4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5. CASO DE ESTUDO	59
5.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO	59
5.2. ESTUDO DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO.....	60
5.2.1. ATAQUE DA VIA.....	61
5.2.2. REBALASTRAGEM	65

5.2.3. REFORÇO COM GEOSSINTÉTICOS	67
5.2.4. RENOVAÇÃO INTEGRAL DA VIA (RIV).....	70
5.2.5. RENOVAÇÃO INTEGRAL DA VIA (RIV) COM REFORÇO DA SUBESTRUTURA.....	72
5.3. ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA AO CASO DE ESTUDO	74
5.3.1. DEFINIÇÃO DA ÁRVORE DE VALOR	76
5.3.2. CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS RELATIVAMENTE AOS CRITÉRIOS	81
5.3.3. INQUÉRITO AOS ESPECIALISTAS.....	83
5.4. UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE M-MACBETH.....	90
5.4.1. INTRODUÇÃO DE DADOS.....	90
5.4.2. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DO MODELO	94
5.4.3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE NO PESO E DE ROBUSTEZ DO MODELO	102
5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	111
6.1. CONCLUSÕES	111
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	114
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	117
ANEXOS.....	124
ANEXO I – DEGRADAÇÃO DAS ZONAS DE TRANSIÇÃO.....	125
ANEXO II – INSTRUÇÕES PARA O INQUÉRITO.....	131
ANEXO III – INQUÉRITO.....	134
ANEXO IV – RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS.....	141
ANEXO V – SOFTWARE M-MACBETH.....	147
ANEXO VI – ARTIGO REALIZADO E APRESENTADO NO CONGRESSO INTERNACIONAL VETOMAC XIV (2018).....	156
ANEXO VII – RESUMO PARA O CONGRESSO BE2018	158

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 – ESQUEMA ESTRUTURAL DA VIA FERROVIÁRIA BALASTRADA CLÁSSICA: PERFIL LONGITUDINAL (ADAPTADO DE SELIG E WATERS, 1994)	5
FIGURA 2.2 – SUPORTE E TRANSMISSÃO DE CARGAS CONCENTRADAS DESDE OS RODADOS ATÉ À FUNDAÇÃO (ADAPTADO DE ESVELD, 2001)	7
FIGURA 2.3 – CONSTITUIÇÃO DO PERFIL TRANSVERSAL DE UM CARRIL DO TIPO VIGNOLE	7
FIGURA 2.4 – TIPOS DE FIXAÇÃO	9
FIGURA 2.5 – TIPOS DE TRAVESSAS	10
FIGURA 2.6 – RELAÇÃO ENTRE A RIGIDEZ VERTICAL DA VIA E ZONAS DE TRANSIÇÃO (PAIXÃO ET AL., 2014)	13
FIGURA 2.7 - VEÍCULO FERROVIÁRIO NA TRANSIÇÃO DE VIA EM ATERRO PARA VIA EM PONTE (ESVELD, 2001).....	13
FIGURA 2.8 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE FORÇAS VERTICAIS E TRANSVERSAIS AO CARRIL [ADAPTADO DE (“ESVELD OFFICIAL WEBSITE,” N.D.)].....	14
FIGURA 2.9 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DA PLENA VIA (ADAPTADO DE PAIXÃO, 2014).....	16
FIGURA 2.10 – PROCESSO DE CONTAMINAÇÃO DA CAMADA DE BALASTRO: (A) BALASTRO LIMPO; (B) BALASTRO APÓS CARGAS DEVIDAS A OPERAÇÕES; (C) BALASTRO CONTAMINADO. (ADAPTADO DE TZANAKAKIS, 2013).....	17
FIGURA 2.11 – (A) APRISIONAMENTO DE ÁGUA NAS DEPRESSÕES DO BALASTRO; (B) SUPERFÍCIE DE ROTURA. (ADAPTADO DE TZANAKAKIS, 2013)	18
FIGURA 3.1 - ESTRUTURAÇÃO DA ACB PARA PROJETOS DE INVESTIMENTO (FALCÃO SILVA E SALVADO, 2015).....	24
FIGURA 3.2 - DISTRIBUIÇÃO DE DOCUMENTOS AMC POR MÉTODOS E APLICAÇÕES (ADAPTADO DE KABIR ET AL., 2014).....	28
FIGURA 3.3 - DISTRIBUIÇÃO E CRESCIMENTO DE ARTIGOS AMC POR SETORES ENTRE 1980 E 2012 (ADAPTADO DE KABIR ET AL., 2014).....	29
FIGURA 3.4 – ETAPAS DA METODOLOGIA MACBETH (BANA E COSTA ET AL., 2017).....	31
FIGURA 3.5 – SEMELHANÇAS E DIFERENÇAS ENTRE AS TÉCNICAS AHP E MACBETH (ADAPTADO DE RIETKÖTTER, 2014).....	35
FIGURA 4.1 – DIAGRAMA REPRESENTATIVO DA DESPESA ANUAL TOTAL DEDICADA À MANUTENÇÃO E RENOVACÃO/REABILITAÇÃO DE FERROVIAS HOLANDESES (CONSIDERANDO O NÍVEL DE PREÇOS DO ANO 2000) [ADAPTADO DE ESVELD, 2001].....	38
FIGURA 4.2 – ORGANIGRAMA DA IP, S.A. (INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL, 2018B).....	40
FIGURA 4.3 - DEFINIÇÃO DE NIVELAMENTO LONGITUDINAL (ADAPTADO DE CEN BRUSSELS, 2010)	43
FIGURA 4.4 - DEFINIÇÃO DE NIVELAMENTO TRANSVERSAL (ADAPTADO DE CEN BRUSSELS, 2010).....	44
FIGURA 4.5 - DEFINIÇÃO DE ALINHAMENTO (ADAPTADO DE CEN BRUSSELS, 2010)	45
FIGURA 4.6 - DEFINIÇÃO DE EMPENO (ADAPTADO DE CEN BRUSSELS, 2010)	46
FIGURA 4.7 - DEFINIÇÃO DE BITOLA PONTUAL (ADAPTADO DE CEN BRUSSELS, 2010)	46
FIGURA 4.8 - VEÍCULO DE INSPEÇÃO GEOMÉTRICA DE VIA – EM 120.....	48
FIGURA 4.9 – EQUIPAMENTO INFORMÁTICO NO INTERIOR DO VIV - EM 120 (FONTUL ET AL., 2016).....	48

FIGURA 4.10 - IDENTIFICAÇÃO DE UM PONTO CRÍTICO COM MARCA DE COR DEIXADA PELO VEÍCULO DE INSPEÇÃO (LEE, 2009).....	49
FIGURA 4.11 – GRÁFICOS RESULTANTES DA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA VIA (FONTUL, 2017).....	50
FIGURA 4.12 – IMAGEM DA MEDIÇÃO DO PERFIL TRANSVERSAL DO CARRIL (BALDEIRAS, 2008).....	50
FIGURA 4.13 – ANTENAS DE GPR INSTALADAS NO VIV – EM 120.....	51
FIGURA 4.14 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GPR (ADAPTADO DE WANG ET AL., 2017).....	52
FIGURA 4.15 – ATUAÇÃO DO GPR: (A) IMAGEM REAL DO LOCAL; (B) DADOS RESULTANTES DA ANÁLISE (WANG ET AL., 2017).....	53
FIGURA 5.1 – MONITORIZAÇÃO (A AZUL) E PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO (A VERDE).....	59
FIGURA 5.2 – ASPETO DO ATAQUE DA VIA PARA RECUPERAÇÃO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA.....	61
FIGURA 5.3 - ATACADEIRA (PLASSER AMERICAN WEBSITE, 2018).....	62
FIGURA 5.4 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA REGULARIZADORA (PLASSER AMERICAN WEBSITE, 2018).....	63
FIGURA 5.5 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ESTABILIZADOR DINÂMICO DE VIA (ADAPTADO DE PLASSER AMERICAN WEBSITE, 2018).....	64
FIGURA 5.6 – (A) EFEITO APÓS REGULARIZAÇÃO DA CAMADA DE BALASTRO; (B) SITUAÇÃO (A) SEGUIDA DE ESTABILIZAÇÃO DINÂMICA DA VIA (PLASSER AMERICAN WEBSITE, 2018).....	65
FIGURA 5.7 - DESGUARNECEDORA-DEPURADORA DE BALASTRO (FERNAVE, 2003).....	66
FIGURA 5.8 – DESGUARNECEDORA-DEPURADORA DE BALASTRO EM FUNCIONAMENTO (PLASSER AMERICAN WEBSITE, 2018).....	66
FIGURA 5.9 – INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA APÓS REABILITAÇÃO COM INTRODUÇÃO DE GEOSINTÉTICOS (ESVELD, 2001).....	68
FIGURA 5.10 - APLICAÇÃO DE GEOTÊXTIL (“GEOSIN GEOSYNTHETICS,” N.D.).....	68
FIGURA 5.11 – REFORÇO DA SUPERESTRUTURA COM GEOGRELHA (PLASSER AMERICAN WEBSITE, 2018).....	69
FIGURA 5.12 – RENOVAÇÃO INTEGRAL DA VIA [ADAPTADO DE PLASSER AMERICAN WEBSITE (2018)].....	71
FIGURA 5.13 – PROCESSO DE REABILITAÇÃO DA VIA (ESVELD, 2001).....	72
FIGURA 5.14 – COLOCAÇÃO DE UMA CSB (PLASSER AMERICAN WEBSITE, 2018).....	73
FIGURA 5.15 – MÁQUINA DE REABILITAÇÃO DA SUBESTRUTURA PARA VIA SIMPLES COM DUAS CORRENTES DE ESCAVAÇÃO E RECICLAGEM INTEGRADA DE MATERIAIS - AHM 800 R (ADAPTADO DE ESVELD, 2001).....	73
FIGURA 5.16 – ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO MACBETH.....	74
FIGURA 5.17 – ILUSTRAÇÃO DA FASE INICIAL DO PROCESSO DE DEFINIÇÃO DA ÁRVORE DE VALOR.....	77
FIGURA 5.18 –ÁRVORE DE VALOR DEFINITIVA.....	78
FIGURA 5.19 – INQUÉRITOS DESTINADOS AOS ESPECIALISTAS.....	83
FIGURA 5.20 – ANÁLISE AOS INQUÉRITOS PREENCHIDOS PELOS ESPECIALISTAS.....	85
FIGURA 5.21 – ASSOCIAÇÃO DE CORES AOS MÉTODOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE RESULTADOS.....	85
FIGURA 5.22 – RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS AO CRITÉRIO 12.....	87
FIGURA 5.23 – MATRIZ REPRESENTATIVA DO CRITÉRIO 12.....	87
FIGURA 5.24 - MATRIZ MACBETH DO CRITÉRIO 12.....	88
FIGURA 5.25 – ÁRVORE DE VALOR INSERIDA NO M-MACBETH.....	91
FIGURA 5.26 – DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS E RESPECTIVO CUSTO.....	91
FIGURA 5.27 – PROPRIEDADES DO CRITÉRIO 1.....	92
FIGURA 5.28 – REFERÊNCIAS DE PONDERAÇÃO.....	92

FIGURA 5.29 – TABELA DE PERFORMANCES	92
FIGURA 5.30 – JULGAMENTOS MACBETH DE DIFERENÇA DE ATRATIVIDADE ENTRE NÍVEIS DE PERFORMANCE NO CRITÉRIO 1	93
FIGURA 5.31 – PONTUAÇÕES DE REFERÊNCIA.....	93
FIGURA 5.32 – TERMÓMETRO GLOBAL PARA OS CASOS 1, 2 E 3.....	94
FIGURA 5.33 – COMPARAÇÃO ENTRE PONTUAÇÕES GLOBAIS DE ALTERNATIVAS GERADAS PARA OS CASOS 1, 2 E 3.....	95
FIGURA 5.34 – PERFIL PONDERADO DAS ALTERNATIVAS SR3, SR4 E SR5	98
FIGURA 5.35 – PERFIL DE DIFERENÇA PONDERADA ENTRE PARES DE ALTERNATIVAS: SR4 COM SR3, SR5 COM SR3 E SR5 COM SR4.....	99
FIGURA 5.36 – GRÁFICOS CUSTO – PONTUAÇÃO PARCIAL DAS ALTERNATIVAS NUM DADO OBJETIVO: O1, O2, O3 E O4.....	100
FIGURA 5.37 – GRÁFICO CUSTO – PONTUAÇÃO GLOBAL DAS ALTERNATIVAS.....	101
FIGURA 5.38 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO PESO DO C7	103
FIGURA 5.39 – ANÁLISE DE ROBUSTEZ (INFORMAÇÃO ORDINAL: LOCAL E GLOBAL).....	105
FIGURA 5.40 – ANÁLISE DE ROBUSTEZ (INFORMAÇÃO ORDINAL: LOCAL E GLOBAL; E MACBETH LOCAL)	105
FIGURA 5.41 - ANÁLISE DE ROBUSTEZ (INFORMAÇÃO ORDINAL E CARDINAL: LOCAL E GLOBAL; E MACBETH LOCAL)	106
FIGURA 5.42 – ANÁLISE DE ROBUSTEZ (OSCILAÇÃO DE $\pm 5\%$ NO PESO DOS CRITÉRIOS)	107

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 – GEOMETRIAS DE CARRIL.....	8
TABELA 3.1 – APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE AMC ÀS INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS (CAETANO ET AL., 2018).....	29
TABELA 4.1 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE O DESVIO PADRÃO E OS NÍVEIS DE QUALIDADE GEOMÉTRICA DA VIA, PARA AS VÁRIAS CLASSES DE VELOCIDADE (REFER, EP, 2009)	55
TABELA 5.1 – LISTA DE CRITÉRIOS	79
TABELA 5.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS RELATIVAMENTE AOS CRITÉRIOS	81
TABELA 5.3 – CUSTO ANUAL RELATIVO DAS ALTERNATIVAS	82
TABELA 5.4 - ESCALA SEMÂNTICA DO MACBETH.....	84
TABELA 5.5 – PESOS ATRIBUÍDOS ÀS RESPOSTAS DOS INQUIRIDOS POR OBJETIVO (MÉTODO 4)	86
TABELA 5.6 – ESCALA DE RETROCESSO EM CONCORDÂNCIA COM O <i>SOFTWARE</i> M-MACBETH	87
TABELA 5.7 – RESULTADOS OBTIDOS PELOS TRÊS CASOS DE ANÁLISE	89
TABELA 5.8 – ORDENAÇÃO DE CRITÉRIOS PELOS TRÊS CASOS DE ANÁLISE	89
TABELA 5.9 – DIFERENÇA E DESVIO-PADRÃO ENTRE PONTUAÇÕES GLOBAIS DE ALTERNATIVAS PARA OS TRÊS CASOS.....	95
TABELA 5.10 - TABELA DE PONTUAÇÕES	96
TABELA 5.11 – TABELA DE PESOS POR CRITÉRIOS E OBJETIVOS.....	97
TABELA 5.12 – RELAÇÃO DE PROPORCIONALIDADE DIRETA (CUSTO-BENEFÍCIO)	102

Lista de Abreviaturas e Símbolos

ACB	Análise Custo-Benefício
AHP	Processo analítico de hierarquia (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
AMC	Análise Multicritério
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
BLS	Barra Longa Soldada
CEN	Comité Europeu de Normalização (<i>European Committee for Standardization</i>)
C_i	Critério “i”
COSIMA	<i>Composite Modelling Assessment</i>
CP	Comboios de Portugal, E.P.E.
CSB	Camada de sub-balastro
D1	Gama de comprimentos de onda: $3\text{ m} < \lambda \leq 25\text{ m}$
D2	Gama de comprimentos de onda: $25\text{ m} < \lambda \leq 70\text{ m}$
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
ELECTRE	<i>ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i>
EN	Norma europeia (<i>European Standard</i>)
INNOTRACK	Innovative Track Systems
EP, S.A.	Estradas de Portugal, S.A.
ERRI	<i>European Rail Research Institute</i>
FCT-UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPR	Radar de prospeção (<i>Ground Penetrating Radar</i>)
IMU	Caixa inercial (<i>Inertial Measuring Unit</i>)
IP, S.A.	Infraestruturas de Portugal, S.A.
k	Rigidez da via

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
M-MACBETH	<i>Software</i> da metodologia MACBETH
MACBETH	<i>Measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique</i>
MAMCA	<i>Multi-Actor Multi-Criteria Analysis</i>
MAUT	<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
N/A	Não aplicável
OGMS	Equipamento laser-ótico de medição (<i>Optical Gage Measuring System</i>)
O_i	Objetivo “i”
NEG	Núcleo de Economia, Gestão e Tecnologia da Construção
NP EN	Versão portuguesa da Norma Europeia
P	Carga aplicada
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations</i>
QN	Nível de qualidade geométrica
QREN	Quadro de Referência Estratégico Nacional
REFER, E.P.	Rede Ferroviária Nacional, E.P.
RFN	Rede Ferroviária Nacional
RIV	Renovação Integral da Via
SR_i	Solução de Reabilitação “i”
SUPERTRACK	Sustained performance of railway tracks
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TQI	Índice de Qualidade Global da via (<i>Track Quality Index</i>)
UIC	União Internacional dos Caminhos-de-ferro (<i>Union Internationale des Chemins de fer</i>)
V(a)	Avaliação global da opção “a”
Vi (a)	Avaliação parcial da opção “a” no critério i
VIKOR	<i>Multicriteria Optimization and Compromise Solution</i> (originalmente em Sérvio, <i>VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje</i>)

VIV	Veículo de Inspeção de Via
WSA	<i>Weighted Sum Approach</i>
y_m	Deslocamento máximo medido no ponto de aplicação da carga
Z_p	Distancia ao plano de rolamento do carril à qual se mede a bitola pontual
λ	Comprimento de onda [m]

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Considerado como um dos principais símbolos da revolução industrial do século XIX, o caminho-de-ferro teve grande influência no desenvolvimento da sociedade até os dias de hoje. Inicialmente o comboio era utilizado como meio de transporte de mercadorias, tornando-se num meio muito eficaz e rentável, uma vez que era capaz de transportar grandes quantidades de mercadoria a custos relativamente reduzidos.

Muito mudou no setor ferroviário desde então, a evolução tecnológica permitiu grandes evoluções, como por exemplo, o desenvolvimento de novas formas de locomoção, o surgimento da alta velocidade ferroviária ou, ainda, infraestruturas ferroviárias mais seguras. Todavia, a ferrovia no decorrer do século XX perdeu a importância que tinha até aquele momento com a proliferação do automóvel e da aviação comercial, e o que era um setor dominado por várias companhias privadas passou a ser controlado por empresas estatais, em regime de monopólio, em cada país. Para isso, era necessário ir de encontro às necessidades e exigências dos passageiros, isto é, cada vez mais se procurou reduzir o tempo de transporte, aumentando a velocidade praticada, quer através da beneficiação da infraestrutura quer da utilização de material circulante mais rápido e inovador. Outro fator muito importante era oferecer comodidade aos passageiros durante as deslocações. No entanto, o caminho-de-ferro soube sobreviver a estas mudanças, adaptar-se e reagir aos desafios, sendo o surgimento da alta velocidade exemplo disso. Com a alta velocidade o caminho-de-ferro voltou a estar associado ao progresso e à tecnologia, que se traduz num crescimento gradual ao nível da segurança, velocidade, conforto e ambiente. Relativamente à velocidade de circulação dos comboios, verificaram-se aumentos de 200 km/h, nas primeiras linhas concebidas, para 300 km/h, nas linhas mais recentes. Relativamente aos aspetos ambientais, os recursos energéticos e as emissões de dióxido de carbono por passageiro e quilómetro associados ao transporte ferroviário de alta velocidade são reduzidos, quando comparados com os valores associados ao transporte rodoviário e aéreo. Obviamente que a qualidade associada aos transportes de alta velocidade também é uma consequência dos seus elevados custos de exploração.

Como todas as obras de engenharia, também a via-férrea sofre degradação ao longo do tempo e, sem os cuidados necessários, esta degradação pode inviabilizar o funcionamento da mesma. Para isso é necessário fazer uma avaliação ao longo do tempo de modo a observar a evolução da degradação e a agir atempadamente. A monitorização e a inspeção são por isso es-

senciais, pois, se os problemas forem detetados com antecedência, o custo de reparação e probabilidade de risco podem ser significativamente menores. Assim, com o passar dos anos houve também uma procura pela melhoria dos métodos de inspeção da via-férrea, de modo a possibilitar uma análise mais eficaz da degradação da mesma.

A reparação da via-férrea é maioritariamente feita tendo em conta apenas a superestrutura, ou seja, quando surge um problema na via, geralmente este é corrigido a nível do armamento da via (carril, travessa e fixações) ou da camada de balastro. Contudo, com o passar do tempo, também a subestrutura pode necessitar de intervenção, de modo a aumentar a qualidade da infraestrutura ferroviária. As zonas de transição, que constituem singularidades importantes na via, também têm atraído especial atenção por parte das entidades gestoras das infraestruturas ferroviárias de vários países. A grande necessidade de manutenção e renovação específicas, que implicam custos muito elevados, estão na origem de uma preocupação generalizada.

Atualmente, um pouco por toda a Europa, colocam-se vários desafios à ferrovia de forma transversal, sendo o principal o aumento da eficiência com os gastos em operações de manutenção, renovação e reabilitação por parte dos gestores ferroviários. As políticas da UE têm como objetivo transferir 50% do tráfego da rodovia para a ferrovia e o marítimo para garantir a sustentabilidade do sistema de transportes na Europa. Atualmente, esta é uma necessidade ainda maior tendo em conta as questões ambientais, assim como a situação económico-financeira do país e da Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP, S.A.). Tendo por base esta filosofia, é fundamental analisar a via-férrea balastrada e os seus constituintes, bem como as características que lhes estão associadas, possibilitando o reconhecimento de possíveis soluções de reabilitação e posterior tomada de decisões onde, para além dos aspetos de natureza económica, sejam igualmente salvaguardadas as questões de responsabilidade socioambiental, segurança e conforto. Neste sentido, torna-se necessário recorrer a uma abordagem multicritério de apoio à decisão, visto que se pretende avaliar diferentes alternativas levando em conta múltiplos critérios.

1.2. Objetivos

O tema abordado nesta dissertação insere-se no âmbito da engenharia da infraestrutura ferroviária, mais concretamente em vias-férreas balastradas, possibilitando um conhecimento mais aprofundado no que diz respeito às metodologias de monitorização e reabilitação de via, assim como das variáveis, critérios e respetivos pesos com influência nas tomadas de decisão de investimento na reabilitação da ferrovia. Neste sentido, pretende-se utilizar uma das diversas metodologias de análise multicritério aplicada às variáveis associadas à reabilitação de estruturas ferroviárias.

A motivação para o desenvolvimento do trabalho que se apresenta nesta dissertação provém, fundamentalmente, do facto de o estudo da viabilidade de soluções de reabilitação com uso de metodologias multicritério ser um campo em desenvolvimento, mas ainda com poucas

aplicações reais. Para o caso de estudo da presente dissertação recorreu-se ao método e *software* MACBETH e M-MACBETH, respetivamente.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação constitui um importante contributo para um melhor aproveitamento dos dados resultantes do plano de monitorização e, consequentemente, para um planeamento mais eficiente das medidas de manutenção e reabilitação ferroviária.

A presente dissertação surge no âmbito do projeto *ACB-Reab* que se integra no Plano de Investigação e Inovação (P2I) do Núcleo de Economia, Gestão e Tecnologia da Construção (NEG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O mesmo integra-se na linha de investigação da área da Análise Custo-Benefício (ACB), mais especificamente na Análise Multicritério aplicada à reabilitação de Infraestruturas Ferroviárias.

1.3. Metodologia

Com o intuito de satisfazer os objetivos mencionados e de fomentar os diferentes assuntos estudados nesta dissertação começa-se por realizar uma recolha bibliográfica (maioritariamente internacional) e respetiva análise. Em paralelo, concretizar-se-á uma breve introdução e abordagem às infraestruturas ferroviárias balastradas, com o intuito de compreender melhor a sua constituição, funcionamento e ações a que estas se encontram sujeitas. Irão ser abordados os mecanismos de degradação ao nível de determinadas camadas e nas zonas de transição. Numa fase seguinte, definir-se-ão os parâmetros geométricos, o processamento de dados e a metodologia de monitorização de via, assim como algumas medidas de reabilitação.

Os capítulos 3 e 4 (de Metodologias de Apoio à Decisão e de Monitorização e Reabilitação, respetivamente) serão desenvolvidos em simultâneo por forma a ser possível a definição das variáveis (objetivos e critérios) que mais importam e condicionam a decisão de investimento na reabilitação da infraestrutura ferroviária. Assim, encontram-se reunidas as condições que viabilizam a concretização do capítulo dedicado ao caso de estudo aplicado a um trecho de uma via-férrea em Portugal, onde, de um ponto de vista prático, se procederá à aplicação de uma metodologia de análise multicritério para a decisão sobre a solução a adotar na sua reabilitação.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos.

No presente capítulo, que é meramente introdutório, procura-se contextualizar a aplicação da análise multicritério à reabilitação de infraestruturas ferroviárias, apresentar os objetivos, descrever a metodologia e, por fim, apresentar a organização da dissertação.

No segundo capítulo procede-se à definição e caracterização da infraestrutura ferroviária (plena via e zonas de transição), definindo-se os sistemas que a compõem, caracterizando os

componentes do sistema via, as ações que em si atuam, assim como os principais mecanismos de degradação da camada de balastro, subestrutura e zonas de transição.

O terceiro capítulo é dedicado às metodologias de apoio à decisão. Este tem início com uma abordagem ao processo de tomada de decisão e à teoria da decisão, assim como os conceitos base a si associados. Segue-se a metodologia de ACB e respetivas fases. Posteriormente, descreve-se a metodologia de análise multicritério (uma das fases da ACB) com especial enfoque na metodologia MACBETH e respetivo *software*, M-MACBETH.

O quarto capítulo é dedicado aos processos de monitorização e reabilitação. Este inicia com uma breve abordagem à organização, gestão e atuação das infraestruturas ferroviárias em Portugal, seguido da definição de monitorização e inspeção, seguido da descrição pormenorizada dos parâmetros geométricos analisados – bitola, nivelamento transversal, nivelamento longitudinal, alinhamento e empeno – e com que instrumentos se podem obter, como se processam esses dados e quais os limites que estes parâmetros devem respeitar. Neste capítulo aborda-se o funcionamento e a constituição do GPR e do VIV – EM 120, uma vez que este último é o veículo que inspeciona a geometria da via-férrea portuguesa.

O quinto capítulo corresponde ao caso de estudo que inicia com uma descrição do processo proposto e do trecho de via-férrea considerado. Segue-se uma secção dedicada às soluções de reabilitação propostas e uma outra com todo o processo de análise multicritério, incluindo as bases, análise e tratamento de dados e resultados obtidos com o inquérito aos especialistas. No quinto subcapítulo apresenta-se toda a inserção de dados no *software* M-MACBETH aquando da elaboração do modelo, seguida da apresentação e discussão de resultados. Segue-se uma secção dedicada à realização de algumas análises de sensibilidade e de robustez ao modelo. Por último, apresentam-se algumas considerações finais.

No sexto capítulo expõem-se as principais conclusões que se obtiveram aquando da análise multicritério, referem-se as principais limitações e dificuldades sentidas, assim como algumas considerações sobre possíveis linhas de investigação futuras.

2. Infraestruturas Ferroviárias Balastradas

2.1. Constituição da via

Este capítulo inicia com a apresentação dos elementos constituintes da via ferroviária balastrada, considerando as suas características e o modo como funcionam. Na Figura 2.1 apresenta-se um corte longitudinal do esquema estrutural deste tipo de via, indicando-se os constituintes.

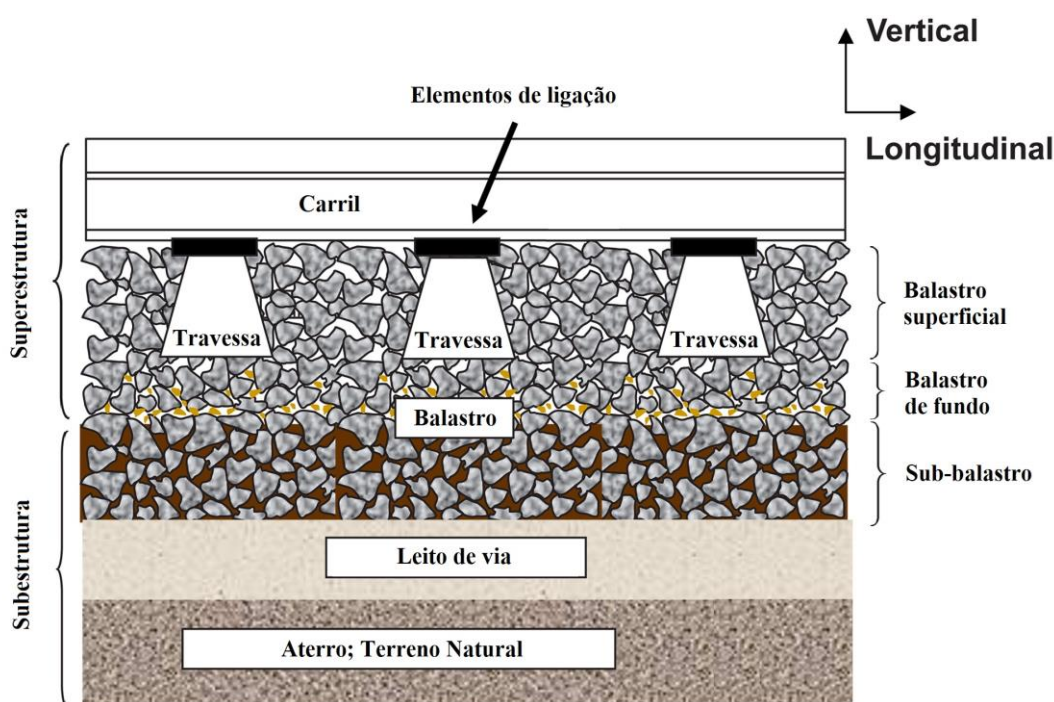


Figura 2.1 – Esquema estrutural da via ferroviária balastrada clássica: perfil longitudinal (adaptado de Selig e Waters, 1994)

Qualquer via-férrea apresenta a sua constituição dividida em superestrutura e subestrutura. No caso da via ferroviária balastrada, os elementos que compõem: i) a superestrutura são: carris, travessas, sistema de fixação, palmilhas, aparelhos de mudança de via (AMV) e o balastro (superficial e de fundo); ii) a subestrutura são: sub-balastro, leito de via (ou camada de coramento, caso seja necessário) e o terreno natural (ou fundação).

A rigidez deste tipo de via é um parâmetro relacionado com o seu comportamento elástico que, por sua vez, depende da rigidez dos elementos que a compõem. Neste sentido, a via ba-

lastrada, também denominada via convencional ou tradicional, tem esta designação por ser provida de balastro.

Este tipo de solução estrutural apresenta as seguintes vantagens (Vale, 2010): i) o elevado conhecimento e experiência do material utilizado; a maior flexibilidade de instalação, manutenção e reabilitação de via (devido ao ponto anterior e também à facilidade de intervenção); ii) melhor conhecimento da vida útil e dos custos associados; iii) as boas condições de dissipação de vibração e ruído, uma vez que a absorção dos mesmos é mais eficaz face à via não balastrada, que apresenta maior rigidez; iv) a possível reciclagem e reutilização do balastro após limpeza (por exemplo, para a CSB); v) a facilidade em modificações do traçado (por exemplo, escala, cruzamentos e desvios).

No entanto, esta também acarreta certas desvantagens (Esveld, 2001; Vale, 2010): i) maior necessidade e custos de manutenção, embora se tratem de processos de manutenção relativamente simples; ii) o desgaste do balastro, por abrasão e fragmentação; iii) a eventual projeção de balastro aquando da passagem dos veículos com a possibilidade de danificar os elementos que constituem a superestrutura; iv) maiores volumes de construção, nomeadamente em túneis (nestes casos, requer maior espessura total face à via não balastrada); v) tendência para deslocamento do carril na direção vertical, transversal e longitudinal; vi) condições inconstantes de drenagem (muito dependentes da qualidade da camada de balastro).

Uma via-férrea destina-se a proporcionar uma circulação ferroviária de uma maneira segura, económica e cómoda. Neste sentido, para que tal seja obtido é imprescindível que os diversos elementos e camadas do sistema cumpram adequadamente as suas funções, assim como a interação entre estes seja adequada na resposta às solicitações impostas.

Nas últimas décadas, os métodos de construção e de conservação deste tipo de via tiveram uma elevada evolução, acompanhando assim o aumento da carga transportada e das velocidades praticadas. É de notar que este tipo de solução oferece uma das melhores relações entre rigidez e amortecimento, sendo por isso uma solução válida para linhas de alta velocidade (Fortunato, 2005).

De seguida, apresentam-se as características dos diversos componentes da via, nomeadamente: i) carril; ii) sistema de fixação; iii) travessas; iv) balastro; v) sub-balastro.

i) Carril

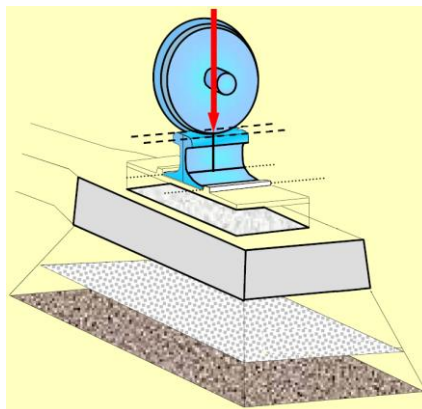


Figura 2.2 – Suporte e transmissão de cargas concentradas desde os rodados até à fundação (adaptado de Esveld, 2001)

O carril é o elemento responsável pelo guiamento dos rodados do veículo num plano, suporte e transmissão das cargas concentradas às travessas, como demonstrado na Figura 2.2. Uma outra função passa pela distribuição das forças resultantes do arranque e da frenagem por aderência. Por forma a cumprir as suas funções, estes elementos têm que possuir uma resistência à flexão (nas direções vertical e transversal) e resistência à compressão na direção longitudinal adequadas e apresentar uma superfície de rolamento lisa, para que a circulação seja segura e cómoda, pois a existência de irregularidades contribui para o aumento do carregamento dinâmico na via (Fortunato, 2005; Tzanakakis, 2013; Vale, 2010).

Uma abordagem a estas condicionantes e a outros tipos de ações encontra-se no subcapítulo 2.2 do presente documento. A contabilização destas é determinante para a eleição do tipo de carril para uma determinada via.

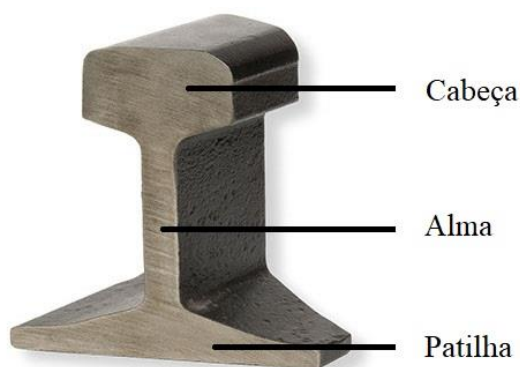


Figura 2.3 – Constituição do perfil transversal de um carril do tipo Vignole

Na Figura 2.3 apresenta-se o perfil transversal de um carril. Este é constituído por três elementos que funcionam como um todo, não existindo quaisquer divisões transversais (Esveld, 2001). Os três elementos são: a cabeça, cuja face superior constitui a mesa de rolamento; a al-

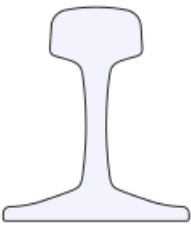
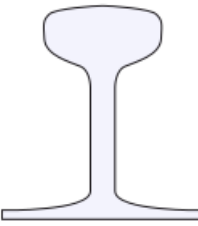
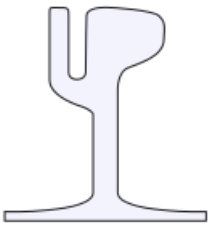
ma, parte vertical que conecta a cabeça à patilha; a patilha, base inferior que assenta sobre a palminha e posteriormente sobre as travessas, alargada e oferecendo resistência à alteração da inclinação transversal dos carris (Infraestruturas de Portugal, 2018a).

Assim como em todos os outros elementos de via, os carris também foram alvo de um processo evolutivo a nível do tipo de material usado, peso e geometria. Inicialmente os carris eram produzidos à base de ferro fundido e de pequeno comprimento, tendo passado por ferro laminado e atualmente aço laminado. Estas alterações surgem como respostas às maiores exigências a nível de esforços causados pela evolução do tráfego ferroviário quer a nível de volume e intensidade. Assim, atualmente o carril deve apresentar, entre outras características uma adequada resistência à tração e ao desgaste (Esveld, 2001).

Um outro processo evolutivo refere-se à elaboração de carris sem juntas, isto é, de barras longas soldadas (BLS) que possuem um comprimento mínimo de 300 metros face ao comprimento máximo de 6 metros das barras curtas. As BLS apresentam algumas vantagens face aos carris com juntas, nomeadamente (Fortunato, 2005; Vale, 2010): i) menor deterioração dos componentes da via e, conseqüentemente um maior intervalo de tempo entre as operações de manutenção e reabilitação; ii) menor produção de ruído e vibrações; iii) menor oscilação dos comboios. Como desvantagens, destaca-se a necessidade de um maior investimento inicial, a existência de esforços internos notáveis com origem nas variações de temperatura e, o facto de as operações de substituição destes elementos serem mais difíceis.

Na Tabela 2.1 apresentam-se algumas das diferentes geometrias de carril mais utilizadas.

Tabela 2.1 – Geometrias de carril

		
Carril UIC 60	Carril Vignole	Carril Phoenix/Grooved

ii) Sistema de fixação

Os elementos de ligação entre o carril e as travessas constituem o sistema de fixação. Existem diferentes tipos de fixação (ver Figura 2.4), sendo que a escolha deste deve ser feita em função do tipo de travessa existente na via. Este elemento da via possui como funções (Esveld, 2001; Fortunato, 2005; Selig e Waters, 1994; Vale, 2010): i) resistir aos esforços originados por ações verticais, laterais, longitudinais, torção e de variação de temperatura; ii) transmitir as cargas aplicadas sobre os carris às travessas; iii) manter o posicionamento correto dos carris sobre

as travessas, a bitola e a inclinação do carril; iv) isolamento elétrico entre o carril e as travessas; v) amortecimento das vibrações causadas pelo material circulante.

As fixações podem ser rígidas ou elásticas. As rígidas consistem no aparafusamento de tira-fundos diretamente na travessa e são fundamentalmente aplicáveis a travessas metálicas e de madeira, podendo ser aplicado um elemento intermédio (chapim metálico). Relativamente às elásticas existem diversos fabricantes, sendo que: na fixação RN/PRX o aperto é feito por meio de um grampo em chapa de aço de mola; as fixações NABLA podem ser intercaladas placas isoladoras constituídas por nylon, entre elementos NABLA e as travessas; as fixações VOSSLOH podem ser utilizadas em travessas de madeira e betão; a fixação PANDROL é especialmente fabricada para aplicação em elementos de betão. Estes apresentam vários designs e caracterizam-se pelas suas propriedades isoladoras, no que diz respeito à vibração da via.

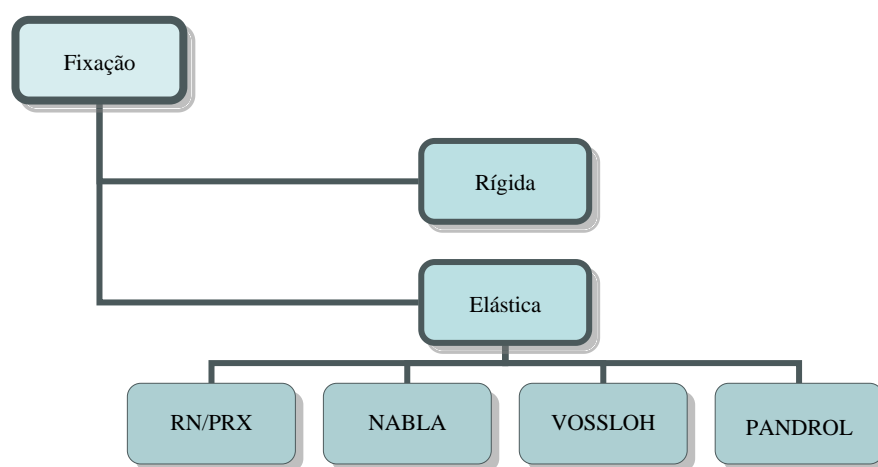


Figura 2.4 – Tipos de fixação

iii) Travessas

Os elementos que se encontram entre os carris e o balastro denominam-se de travessas. As travessas têm como principais funções (Fortunato, 2005; Tzanakakis, 2013): i) receber e transmitir, uniformemente, as cargas (estáticas e dinâmicas) dos carris para a camada de balastro; ii) sustentar o sistema de fixação dos carris; iii) manter a bitola e a inclinação do carril; iv) restringir movimentos verticais, laterais e longitudinais dos carris; v) amortecer vibrações e redução de ruído. Por forma a cumprir as suas funções as travessas devem possuir uma elevada resistência às ações mecânicas e climáticas.

Em termos históricos, a madeira foi o primeiro material a ser utilizado na conceção de travessas. As travessas metálicas, de betão armado (bibloco) e betão pré-esforçado (monobloco) foram aparecendo e substituindo gradualmente as de madeira. Atualmente, e perante a evolução da preocupação com o meio ambiente, diversos estudos apontam para uma solução com maior sustentabilidade ambiental e económica, isto é, a utilização de materiais compósitos na constru-

ção de travessas, visto serem fruto de processos ecológicos (Fortunato, 2005; Vale, 2010). Uma representação dos diversos tipos de travessas existentes encontra-se na Figura 2.5.

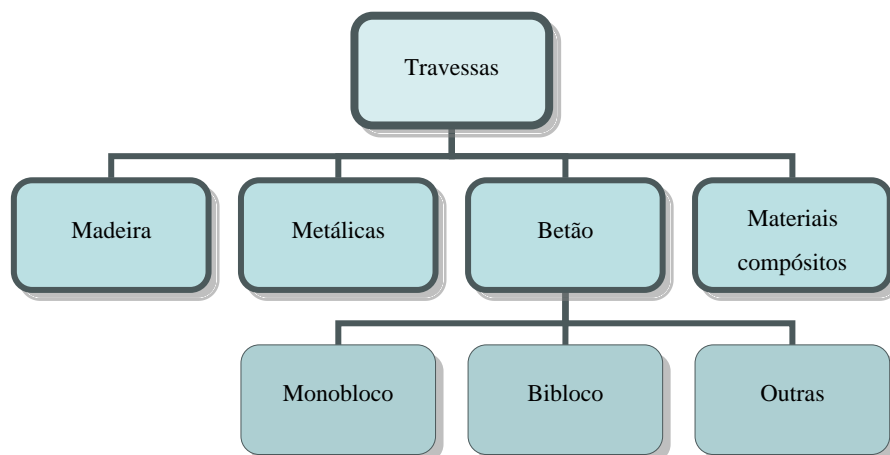


Figura 2.5 – Tipos de Travessas

iv) Balastro

O balastro não é mais do que um agregado britado, que permite através do atrito interno, a absorção de tensões de compressão. O mesmo apresenta grande capacidade de carga quando solicitado verticalmente, o que não se verifica quando a solicitação ocorre transversalmente ao eixo da via. A altura da camada de balastro deve estar compreendida entre os 25 e os 30 centímetros, sob a face inferior das travessas, medida na prumada do carril da fila baixa (Esveld, 2001; Tzanakakis, 2013).

O material para balastro deve ser um material granular, 100% britado, isento de materiais poluentes, tais como partículas orgânicas e expansivas, metal ou plástico. Este pode apresentar, na sua constituição, granitos, gabros, dioritos, doleritos, basaltos e quartzitos, de acordo com (REFER, EP, 2008). Em conformidade com a mesma fonte e a norma NP EN 13450 (2005), o balastro pode ser dividido em duas categorias:

- Balastro Tipo I – para os sistemas ferroviários de alta velocidade e velocidade alta;
- Balastro Tipo II – para rede convencional.

O balastro é geralmente fornecido pela empresa construtora quer na construção de linhas novas, quer na conservação e na renovação das já existentes, em conformidade com as especificações da REFER (IT.GEO.001 - “Fornecimento de Balastro e Gravelha”), a Norma Portuguesa NP EN 13450:2005 e a respetiva errata NP EN 13450:2005/AC:2010, referente a “Agregados para balastro de via-férrea”. Nesta Norma Portuguesa também se encontram definidos os limites de aceitação para os valores dos ensaios de aferição das condições do balastro.

As características técnicas que são alvo de análise para aceitação dos materiais para balastro são: a resistência mecânica, a dimensão, a granulometria, o conteúdo de partículas finas (<0,5 mm), o conteúdo de finos (<0,063 mm), a forma (índice de achatamento, índice de forma

e comprimento) e o conteúdo em materiais indesejáveis (Fortunato, 2005; REFER, EP, 2008). A degradação do balastro deve-se principalmente a duas características: a resistência à fragmentação e ao desgaste. Relativamente ao seu comportamento, este é maioritariamente influenciado pelas suas características mecânicas (resistência e deformabilidade) e hidráulicas (permeabilidade). No entanto, existem outros fatores a considerar, tais como as características da superestrutura da via, o tipo e a frequência dos trabalhos de conservação e as próprias solicitações do material circulante (Fortunato, 2005).

O balastro encontra-se sob a ação de várias forças, nomeadamente (Fortunato, 2005): i) a componente de direção vertical resulta da combinação dos três tipos de carregamento (estático, quase-estático e dinâmico) abordados posteriormente no subcapítulo 2.2. O balastro opõe-se a estas através: i) da resistência direta das partículas de balastro; ii) da componente de direção longitudinal e transversal, que é equilibrada pelo atrito que se gera entre as partículas de balastro e as travessas, e pelo imbricamento das partículas de balastro; iii) uma força com origem no processo de manutenção de via (por exemplo no processo de “ataque da via”). Assim, pode-se afirmar que a camada de balastro desempenha um papel fundamental no comportamento da via, quer no que se refere à estabilidade vertical, quer relativamente à estabilidade horizontal.

A camada de balastro é caracterizada por um comportamento plástico face às forças a que está sujeita. Após sucessivos carregamentos, os materiais que constituem esta camada tendem a sofrer um rearranjo, originando-se assim assentamentos de caráter irreversível. Os processos de conservação e reabilitação permitem contrariar estes assentamentos plásticos, permitindo um novo rearranjo do material e encontra-se em detalhe no subcapítulo 5.2.

Relativamente às suas funções, a camada de balastro deve (Esveld, 2001; Fortunato, 2005; Infraestruturas de Portugal, 2018a; Selig e Waters, 1994; Vale, 2010): i) suportar e encastrear as travessas ao fornecer-lhes resiliência e energia de absorção, contribuindo assim para atenuar as vibrações e ruído; ii) resistir às ações verticais, laterais e longitudinais provenientes das travessas e restringir esses mesmos deslocamentos; iii) uniformização e redução das tensões transmitidas pelas travessas às camadas subjacentes; iv) proteger as camadas subjacentes relativamente às ações climáticas (chuva e gelo-degelo); v) conferir elasticidade à via; vi) facilitar as pequenas operações de conservação e reabilitação da via-férrea (correção de nivelamento e alinhamento da via) através do rearranjo do balastro (sem a substituição de materiais); vii) escoar águas pluviais; viii) evitar o aparecimento de vegetação.

v) Sub-balastro

A CSB localiza-se entre o terreno de fundação (ou leito de via, caso exista) e a camada de balastro, sendo constituído por material de granulometria extensa e apresenta uma espessura, regra geral, da ordem dos 30 centímetros, devendo esta ser constante ao longo de toda a linha por forma a facilitar a utilização de equipamentos nas operações de conservação e reabilitação da via-férrea (Esveld, 2001; Fortunato, 2005).

Na sua constituição, de acordo com a (REFER, EP, 2007), a CSB deve apresentar material resultado de extração em pedreira ou escavação em linha, com ou sem mistura de agregados naturais.

Em geral, exige-se que a CSB seja pouco deformável (isto é, que apresente um módulo de rigidez elevado) e tenha baixa permeabilidade. Estas características podem ser alcançadas com a utilização de um único material ou um conjunto de materiais com distintas funções (Fortunato, 2005).

No campo das deformações é de se destacar que o comportamento desta camada ao nível de deformação vertical permanente é muito influenciado pelas características de deformabilidade da superfície onde esta assenta (Fortunato, 2005).

De seguida apresentam-se as principais funções desta camada e, tomando por base a afirmação anterior é possível compreender melhor algumas delas (Fortunato, 2005; Tzanakakis, 2013; Vale, 2010): i) proteger a plataforma relativamente às ações cíclicas de gelo-degelo; ii) reduzir os níveis de tensão na base da fundação até um valor aceitável; iii) função drenante e filtrante, evitando a interpenetração e migração de partículas finas da fundação para a camada de balastro, deixando apenas escoar essas águas; iv) separação física das duas camadas adjacentes, evitando o desgaste da fundação pela ação mecânica das partículas da camada de balastro; v) ação impermeabilizante, evitando que as águas cheguem da camada de balastro à fundação, sendo por isso conduzidas para órgãos de drenagem longitudinal.

A ausência desta camada ou de qualquer outra com o mesmo fim, representa um aumento de custos relativamente à manutenção da via, visto que, não são cumpridas as funções apresentadas anteriormente. É ainda de ressaltar que, em diversas situações são aplicados geossintéticos (geogrelhas, geomembranas ou geotêxteis) ou betumes asfálticos, conjuntamente com camadas de materiais granulares ou em sua substituição para melhor desempenho de determinadas funções (Fortunato, 2005).

2.2. Zonas de transição

Atualmente, o transporte ferroviário continua a ser uma notável alternativa face aos outros meios de transporte e, de modo a tornar este meio ainda mais atrativo, nota-se um investimento intensivo para que se pratiquem maiores velocidades e conforto, de modo a ir ao encontro das necessidades dos utilizadores. Contudo, com o aumento da velocidade é necessário ter preocupações acrescidas, pois, para atingir maiores velocidades o traçado das linhas férreas deve ser tão reto quanto possível, o que implica o atravessamento de solos com menor qualidade e, por vezes, a construção de estruturas de grande rigidez: pontes, passagens hidráulicas, passagens de fauna, entre outras. A velocidade praticada e o conforto alcançado estão intrinsecamente ligados às zonas de transição que são pontos sensíveis da infraestrutura ferroviária e merecem particular atenção (Cerdeiral, 2014).

A designação de zonas de transição é usualmente aplicada para identificar as zonas da via onde ocorrem variações mais ou menos bruscas ao nível das condições de suporte, tais como (Ribeiro, 2012): i) transição de via em aterro para via sobre uma estrutura, como uma ponte, um túnel ou um atravessamento inferior; ii) transição proporcionada pela variação das características do solo de fundação, como o aparecimento de zonas rochosas ou zonas de terrenos aluvionares; iii) transição de uma zona de via em aterro para uma zona em escavação; iv) transição de uma via balastrada para uma via não balastrada; v) transição proporcionada pela presença de AMV.

A variação das condições de suporte da via traduz-se em variações da rigidez vertical da via que são experimentadas pelos veículos, tal como ilustram a Figura 2.6 e a Figura 2.7. Essa mudança de rigidez origina forças dinâmicas elevadas que dependem essencialmente da velocidade, da taxa (ou rácio) de rigidez, das propriedades de amortecimento e do comprimento de transição (Esveld, 2001).

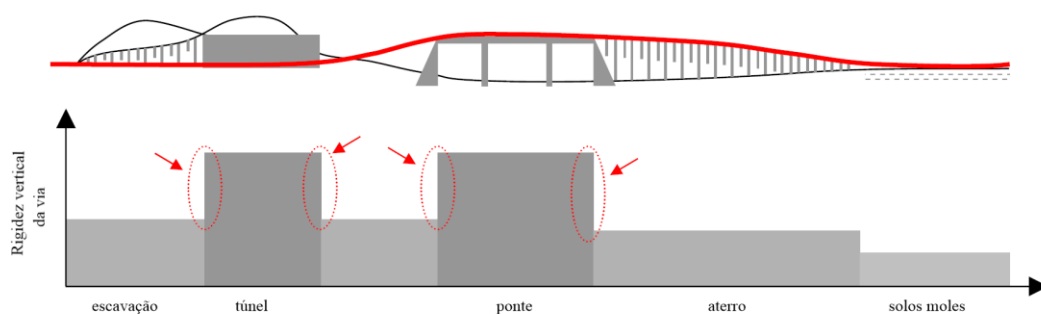


Figura 2.6 – Relação entre a rigidez vertical da via e zonas de transição (Paixão et al., 2014)

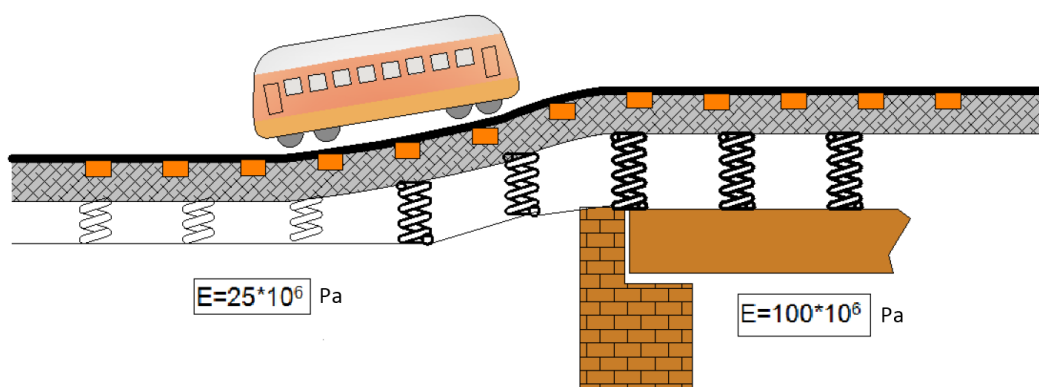


Figura 2.7 - Veículo ferroviário na transição de via em aterro para via em ponte (Esveld, 2001)

O grande desafio consiste em criar nas zonas de transição condições que atenuem as variações de rigidez, de forma a obter um apoio uniforme, que propicie melhor desempenho da via reduzindo as necessidades de manutenção. Neste contexto, a avaliação e controlo da rigidez da

via assume grande importância e, apesar de se ter verificado nos últimos anos grande evolução nesta área com a proposta de novas metodologias, este constitui um campo de investigação ainda em franco desenvolvimento (Ribeiro, 2012).

Dada a importância destas zonas na construção ferroviária, mais pormenores sobre a sua degradação encontra-se disponível no **Anexo I**.

2.3. Ações

Os vários tipos de ações atuantes na via-férrea devem ser tidos em conta para um correto dimensionamento estrutural da via-férrea e compreensão das funções que os elementos constituintes desta devem desempenhar. Estas ações podem ser estáticas, quase-estáticas ou dinâmicas e desenvolvem-se segundo três direções (Esveld, 2001; Fortunato, 2005; Tzanakakis, 2013): i) vertical (perpendicular ao plano de rolamento dos carris); ii) longitudinal (paralelamente aos carris); iii) lateral (paralelamente ao eixo longitudinal das travessas). Estas forças devem-se principalmente às características da via, ao material circulante e à velocidade que este pratica, assim como ao estado de conservação de ambos.

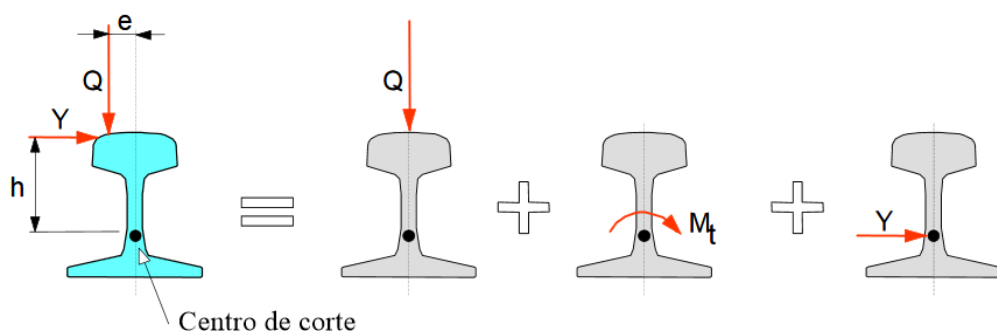


Figura 2.8 – Exemplo de aplicação de forças verticais e transversais ao carril [adaptado de (“Esveld Official Website,” n.d.)]

As forças estáticas resultam essencialmente do peso próprio dos veículos e dos elementos constituintes da via; as forças dinâmicas devem-se à interação roda-carril, ou seja, resultam das características de ambos os elementos, do seu estado de conservação, da velocidade do material circulante e das condições ambientais; as forças quase-estáticas incorporam os efeitos da força centrífuga (em curva) e forças resultantes de ventos cruzados.

De seguida, segue-se uma breve descrição dos três tipos de forças mencionadas que atuam na via-férrea:

i) Forças verticais

Estas forças têm origem essencialmente estática, isto é, no peso próprio do veículo e dos elementos que constituem a via. No entanto, estas resultam da combinação dos três tipos de carregamento – estático, quase-estático e dinâmico (Esveld, 2001; Tzanakakis, 2013).

ii) Forças longitudinais

As forças longitudinais podem ter origem em (Berggren, 2009; Fortunato, 2005): i) aceleração e frenagem do veículo; ii) atrito; iii) diferenciais de temperatura, resultando na expansão e retração dos carris; iv) flexão dos carris aquando da passagem dos veículos; v) possíveis deformações existentes; vi) esforços provenientes da soldadura.

iii) Forças transversais/laterais

As forças laterais que atuam no carril podem ter a sua origem associada aos três tipos de carregamento e assumem valores mais elevados para alinhamentos curvos. A força total de direção transversal (lateral) é composta pela componente transversal (Esveld, 2001): i) da força centrífuga não compensada - em curva; ii) da força resultante de ventos cruzados; iii) das forças dinâmicas (por exemplo, devidas a irregularidades geométricas da via); iv) da força de atrito resultante da interação roda-carril.

As forças laterais, além de afetarem o conforto dos passageiros, são cruciais para a segurança do comboio, pois se estiveram fora do intervalo de valores admissíveis (isto é, a velocidade ser inferior ou superior à velocidade de projeto) podem dar origem a descarrilamento.

2.4. Degradação da via

A infraestrutura ferroviária degrada-se continuamente ao longo do seu ciclo de vida útil. A degradação (ou deterioração) pode ser entendida como a redução da qualidade original devido a vários fatores, sendo as cargas dinâmicas o principal fator contribuidor (Tzanakakis, 2013). No entanto, as heterogeneidades da infraestrutura ferroviária conduzem a uma degradação não uniforme ao longo do tempo e do espaço, isto é, a uma degradação mais acentuada em certos locais que noutros, como por exemplo, em zonas de transição. Esta degradação revela-se essencialmente através de assentamentos diferenciais permanentes ao longo da via, fadiga e desgaste dos componentes. Relativamente às heterogeneidades, estas devem-se, por exemplo, às diferentes condições de apoio existentes e materiais aplicados, aos diversos tipos de carregamento aplicados (em especial, os dinâmicos por serem variáveis) pelos veículos e às pequenas imperfeições existentes principalmente nos elementos roda e carril (Paixão, 2014; Tzanakakis, 2013).

A qualidade geométrica de uma via ferroviária caracteriza-se em termos de parâmetros geométricos, nomeadamente nivelamentos longitudinal e transversal, alinhamento (longitudinal), bitola e empeno. Uma abordagem a estes parâmetros em maior detalhe encontra-se no subcapítulo 4.2.1. Na evolução ao longo do tempo de cada um destes parâmetros geométricos, con-

sidera-se uma fase de degradação e uma fase de recuperação da qualidade geométrica, sendo esta última consequência de ações de manutenção e (ou) reabilitação. A fase de degradação resume-se ao desvio destes parâmetros em relação ao seu valor médio ou ao valor de projeto. Assim, a degradação é um aspeto importante a ser avaliado, visto que esta resulta numa menor qualidade do serviço e pode afetar a segurança da operação ferroviária.

Conforme ilustra a Figura 2.9, o processo normal de degradação da qualidade geométrica da via pode ser dividido em duas fases, eventualmente três. Em primeiro lugar, após a construção ou renovação da via-férrea, verifica-se uma rápida degradação que se estabiliza após a passagem dos primeiros milhares de eixos de comboios. De seguida, surge uma fase de degradação linear com o tempo (ou o tráfego), onde as taxas mais baixas são mais ou menos constantes. Uma eventual terceira fase corresponde a um rápido aumento na taxa de degradação da via, quando se torna primordial intervir com trabalhos de manutenção ou reabilitação (Paixão, 2014).

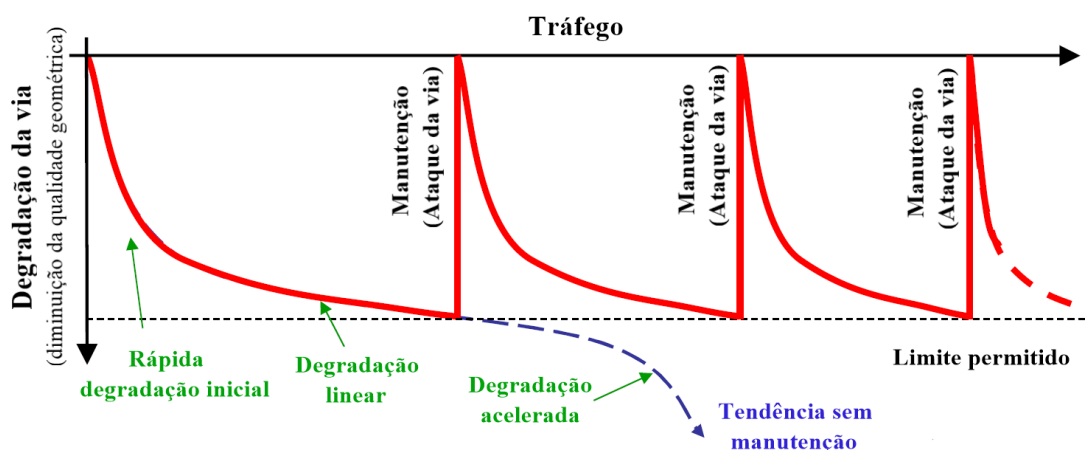


Figura 2.9 – Representação simplificada do processo de degradação da plena via (adaptado de Paixão, 2014)

Em condições normais, os elementos que constituem a superestrutura, nomeadamente os carris e o balastro, apresentam um desgaste mais acentuado que a subestrutura.

O ruído e as vibrações têm origem na parcela correspondente às forças dinâmicas e contribuem para um maior desconforto dos passageiros, problemas de carácter ambiental e para a degradação da infraestrutura ferroviária. A diminuição do (elevado) ruído e de vibrações de baixas frequências traz benefícios económicos, sociais e a nível de engenharia (Tzanakakis, 2013).

A degradação da via traduz-se, geralmente, por um dos seguintes estados: perda de estabilidade, perda de resiliência e ocorrência de elevados assentamentos permanentes ao nível dos carris (Fortunato, 2005).

De seguida, enumeram-se os mecanismos que normalmente conduzem à degradação da via férrea, nomeadamente da camada de balastro e da subestrutura.

2.4.1. Degradação da camada de balastro

As características mecânicas dos materiais normalmente usados e a geometria da camada de balastro garantem a sua estabilidade relativamente às ações a que está sujeita. Neste sentido, a degradação desta camada por perda de estabilidade é pouco frequente. Assim, as principais preocupações relativamente ao desempenho desta camada estão relacionadas com a deformabilidade e com a permeabilidade da mesma. A deformação excessiva da camada de balastro constitui um dos principais contributos para os assentamentos permanentes da via, enquanto que o preenchimento dos vazios do balastro por partículas finas e água diminui a sua resiliência. No primeiro caso, conduz a uma fraca geometria da via, aumentando assim as forças de interação roda-carril. Quando se sucede o segundo caso, considera-se que o balastro está contaminado. Esta contaminação contribui para a aceleração do processo de alteração do balastro (ver Figura 2.10), para a redução da permeabilidade da camada, dificultando assim uma adequada drenagem das águas pluviais (Fortunato, 2005; Tzanakakis, 2013).

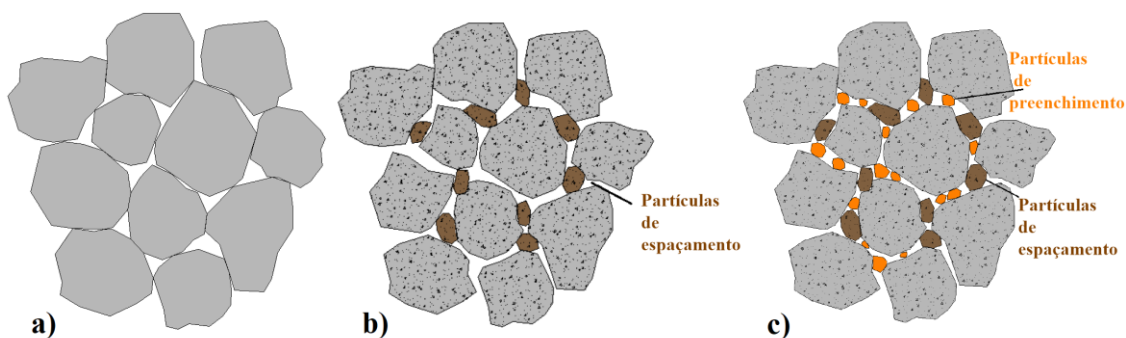


Figura 2.10 – Processo de contaminação da camada de balastro: (a) balastro limpo; (b) balastro após cargas devidas a operações; (c) balastro contaminado. (adaptado de Tzanakakis, 2013)

Desta forma, podem-se enumerar os vários mecanismos que conduzem à contaminação do material que constitui esta camada, nomeadamente (Fortunato, 2005; Marques, 2017; Tzanakakis, 2013): i) a alteração granulométrica das partículas do balastro; ii) a infiltração de materiais a partir da superfície; iii) a alteração do material da travessa (desgaste); iv) a infiltração de materiais a partir das camadas granulares subjacentes (de cima para baixo); v) a infiltração de materiais a partir da fundação (de baixo para cima).

2.4.2. Degradação da subestrutura

A degradação da subestrutura ocorre fundamentalmente na presença de água. A água existente entre a subestrutura e a superestrutura conduz à contaminação do balastro e sub-balastro, contribuindo assim para um ineficaz sistema de drenagem e consequentemente para um enfraquecimento da subestrutura. Os principais fatores que contribuem para a degradação desta camada são (Tzanakakis, 2013): i) carregamento dinâmico repetido (afetando assim a rigidez da camada); ii) peso das camadas sobrejacentes e do material circulante (conduzindo, por exemplo, a um excesso de consolidação dos solos e consequente deformação plástica excessiva dos mesmos); iii) fatores ambientais, tais como solos finos ou de fraca qualidade na génese da fundação (como por exemplo, argilas e siltes); iv) a presença de um alto teor em água nos solos.

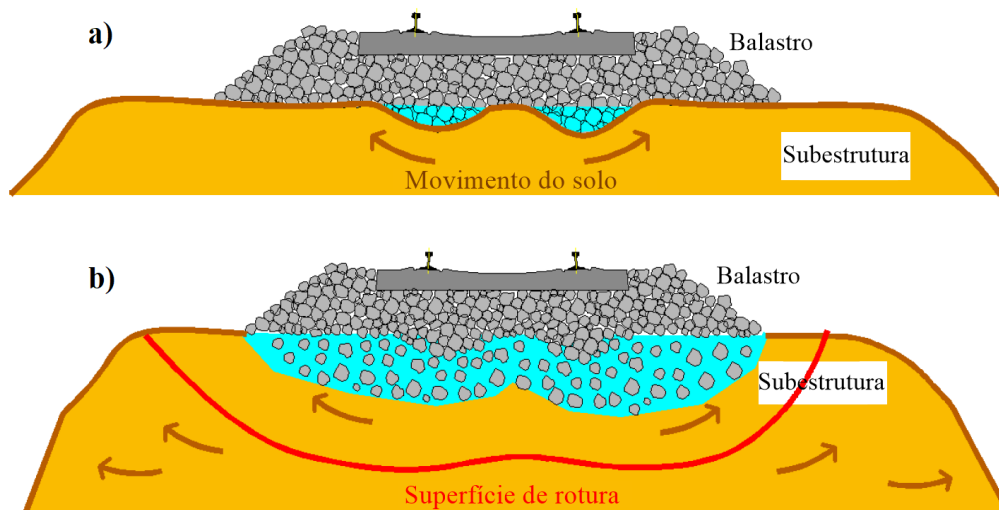


Figura 2.11 – (a) aprisionamento de água nas depressões do balastro; (b) superfície de rotura. (adaptado de Tzanakakis, 2013)

A camada de balastro e sub-balastro ao não estar devidamente compactada (possivelmente devido a deformações plásticas) gera locais de depressão (bolsadas de balastro), ideias para a acumulação de águas. Quando tal ocorre, o solo ao deformar-se tende a deslocar-se horizontalmente e, estando este saturado, a superfície de rotura torna-se mais provável de ser atingida quanto maior for o seu conteúdo em finos. Nas condições da Figura 2.11(b) pode-se afirmar que se está perante uma camada instável (Tzanakakis, 2013).

Uma forma de combater esta situação tem sido através da introdução de materiais sintéticos (como geotêxteis) por forma a melhorar a capacidade resistente desta camada.

Para além dos mecanismos de degradação referidos, existem ainda outros que podem suceder e contribuir para a degradação parcial ou total, tais como (Fortunato, 2005): i) a liquefação de solos granulares (isto é, a perda de resistência ao corte devido ao aumento da pressão

neutra – que pode ocorrer em solos granulares saturados, quando sujeitos às vibrações associadas às cargas repetidas dos comboios); ii) a rotura global da fundação; iii) assentamentos por consolidação de camadas profundas (principalmente em linhas antigas que se encontram a ser reabilitadas); iv) expansão e retração dos solos (em especial, na presença de argilas de elevada plasticidade); v) a congelação dos solos devido à ação do gelo (quando o solo é suscetível à ação do gelo, existe água e as temperaturas são baixas); vi) o colapso e a fluência dos terrenos.

2.5. Considerações finais

Como se viu anteriormente, a superestrutura e subestrutura compõem a via ferroviária balastada. Por sua vez, abordaram-se os elementos constituintes da mesma, as suas características e o modo como funcionam e interagem entre si. De seguida, explorou-se a importância das zonas de transição, os diferentes tipos existentes e respetivas particularidades, tendo-se concluído que a avaliação e controlo da rigidez da via assume um papel extremamente importante.

Para um correto dimensionamento estrutural da infraestrutura ferroviária é essencial se conhecer quais os diferentes tipos de ações atuantes, as suas origens e repercussões em termos de degradação. Relativamente à degradação da via-férrea foi dada particular atenção à existente na camada de balastro, subestrutura e em zonas de transição.

Todos estes assuntos abordados no Capítulo 2 permitem concluir que a possibilidade de prever o comportamento da via para um dado conjunto de condições é essencial para estabelecer orientações racionais para o projeto, construção e reabilitação.

3. Metodologias de Apoio à Decisão

3.1. Considerações iniciais

Desde a Antiguidade que a decisão suscita reflexão por parte de muitos filósofos e intelectuais, uma vez que a capacidade humana para a decisão é uma qualidade fundamental e algo que nos distingue dos restantes animais. Com a evolução temporal, evoluiu também a necessidade de tomar uma maior quantidade de decisões de cada vez, resultado de os problemas de decisão serem cada vez mais complexos e em grande volume.

Segundo Guo (2008), a definição de decidir (em inglês, **DECIDE**) corresponde ao acrónimo de seis atividades específicas necessárias no processo de tomada de decisão: i) *Define the problem*; ii) *Establish the criteria*; iii) *Consider all the alternatives*; iv) *Identify the best alternative*; v) *Develop and implement a plan of action*; vi) *Evaluate and monitor the solution and feedback when necessary*.

Por outras palavras, a tomada de decisão corresponde ao processo de desenvolver, analisar e escolher alternativas de entre várias. Essas alternativas são comparadas e avaliadas, é feita uma escolha, sendo posteriormente tomada uma decisão que é implementada. No entanto, o processo de tomada de decisão não termina com a escolha de uma alternativa e a sua implementação, sendo ainda necessário proceder à avaliação e monitorização de todo o processo, podendo haver a necessidade de que todo o processo seja repetido (Harrison, 1987). Trata-se assim, de um processo cíclico, pois a avaliação pós-implementação pode produzir resultados pouco satisfatórios, ou que fiquem aquém dos objetivos estabelecidos, fazendo com que todo o processo recomece novamente.

Tendo em conta a concorrência que existe nas diferentes áreas, cada decisão, por mais simples que pareça, pode resultar numa vantagem ou desvantagem, que faça a diferença em relação aos outros concorrentes. De facto, em determinadas ocasiões, tomar a melhor decisão pode ser uma tarefa bastante árdua, seja devido: i) à incerteza ao longo do período de tempo sobre o qual terá efeito; ii) às opções tomadas pelos vários concorrentes; iii) à sua enorme complexidade; iv) à ambiguidade; v) ao risco associado.

Ao processo de tomada de decisão está associado um investimento de tempo e dinheiro, que por vezes não será recuperável. Para tal, é recomendável uma otimização dos recursos dis-

poníveis, por forma a alcançar os objetivos instituídos. É também importante salientar que as influências das decisões irão recair sobre o futuro, e não sobre o passado.

Com o aparecimento de problemas de decisão complexos, isto é, aqueles em que existem vários objetivos que entram em conflito com os restantes, sendo por vezes impossível encontrar uma decisão ótima, tornou-se necessário encontrar a melhor relação possível entre os objetivos. Neste contexto, o processo de tomada de decisão apoiou-se nos conceitos e técnicas da teoria da decisão, tendo estes originado vários métodos de apoio à decisão. Com estes métodos espera-se conseguir estruturar e organizar esse processo e rentabilizar e aumentar a eficiência das decisões tomadas, reduzindo assim o risco associado a essa escolha. De entre esses métodos destacam-se os métodos de ACB (Roy, 2005).

3.2. Conceitos base da teoria da decisão

De forma a tornar mais fácil a abordagem ao tema em análise e aos subcapítulos que se seguem, apresentam-se alguns conceitos da teoria de decisão referentes às obras públicas: i) ator; ii) decisor ou agente de decisão; iii) modelo; iv) analista; v) ponto de vista; vi) alternativa; vii) critério; viii) peso; ix) objetivo.

O **ator** é uma pessoa ou um grupo de pessoas (incluindo o cliente) que têm um interesse no processo de decisão e o poder de influenciar direta ou indiretamente a decisão. Para além destes, existem terceiros (como por exemplo, grupos ambientalistas) que não participam ativamente no processo de decisão, mas são afetados em termos gerais pela decisão final. No entanto, as suas preferências devem ser tidas em conta (Rogers et al., 2000; Sousa e Cardoso, 2010).

O **decisor (ou agente de decisão)** diz respeito a uma pessoa ou um grupo de pessoas que realiza(m) escolhas e que assume(m) preferências como um todo. Os decisores podem ser pessoas que pertencem à organização, peritos externos ou até mesmo pessoas que, não estando diretamente ligadas a uma entidade, são dotadas de conhecimentos importantes para a tomada de decisão em causa. A escolha dos decisores é importante, na medida em que estes vão intervir diretamente no processo, envolvendo-se no tema em análise e contribuindo para a escolha da decisão final. Assim sendo, pode-se afirmar que o processo de decisão é altamente influenciado pelos diferentes valores dos decisores, nomeadamente a sua cultura, formação, religião, experiência, intuição, aspetos emotivos, entre outros aspetos. Estes devem estabelecer comparações com base na avaliação das alternativas de acordo com vários critérios e representar nas suas decisões os valores organizacionais e as perspetivas chave (Dodgson et al., 2009; Rogers et al., 2000).

O **modelo** é uma representação de um problema real, que utiliza um conjunto de operações matemáticas para transformar os gostos e as opiniões dos decisores com a finalidade de ser obtido um resultado. Os modelos podem ser descritivos (representam o que os decisores fazem) ou normativos (representam o que os decisores devem fazer). Dois modelos comuns são as ma-

trizes de decisão e as árvores de decisão. As características e o objetivo do problema em análise são determinantes para a eleição do modelo de decisão multicritério.

O **analista** é a entidade responsável pela seleção do modelo a ser empregue, por explicar aos decisores o funcionamento do modelo escolhido, por obter as informações necessárias para o modelo, por auxiliar os decisores na recomendação de uma solução coerente e consiste e por interpretar os resultados de forma facilmente compreensível. Para tal, o analista deve possuir experiência e conhecimento em processos de tomada de decisão. Quanto mais complexo for o modelo, maior será a importância do analista para assegurar o sucesso de todo o processo (Rogers et al., 2000).

Um **ponto de vista** representa os diferentes eixos ao longo dos quais os diversos atores ou participantes do processo decisório justificam, transformam e disputam as suas preferências (Rogers et al., 2000).

Uma **alternativa** ou ação potencial é aquilo que constitui o objeto de decisão ou aquilo ao qual o processo de decisão é dirigido. Formalmente, uma alternativa deve ser caracterizada, para além da sua designação, pelos seus atributos, que a irão definir completamente no ponto de vista da decisão. É assumido que o conjunto das alternativas é apenas composto por aquelas que respeitam as restrições definidas para o problema. Assim, as alternativas, que representam as opções disponíveis para o decisor têm que ser representáveis, quantificáveis e classificáveis.

Um **critério** pode ser definido como uma ferramenta que permite a comparação de alternativas de acordo com um ponto de vista particular. Assim, cada critério representa as preferências do decisor de acordo com determinado ponto de vista. No âmbito de uma abordagem multicritério, o decisor constrói vários critérios partindo de vários pontos de vista (Rogers et al., 2000). É também fundamental que estes sejam claros, concretos, independentes, operacionalizáveis, não redundantes e mensuráveis. Estes podem ser quantitativos ou qualitativos (Dodgson et al., 2009).

Um **peso** consiste num valor numérico que está associado a um critério de avaliação e indica a importância deste critério relativamente a outros perante uma situação de decisão. Quanto maior for o peso, maior é a importância do critério. Os pesos associados aos critérios podem ser determinados através de um processo de seleção das preferências do decisor que garante a consistência das opções tomadas.

Os **objetivos** tomam em consideração as necessidades ou desejos do agente de decisão, e representam as suas orientações de preferência para os critérios. Os objetivos podem ser conflituosos, isto é, existem situações em que só é possível melhorar um objetivo à custa de outro. No entanto, existem alguns casos em que se podem melhorar simultaneamente dois ou mais objetivos. Deve-se criar uma hierarquia de objetivos, permitindo a sua estruturação, isto é, começando por um objetivo genérico ou fundamental, faz-se a divisão ou especificação do mesmo em objetivos de mais baixo nível, até estarmos perante objetivos diretamente relacionados com cri-

térios. No entanto, é aconselhável evitar introduzir objetivos pouco relevantes para o problema, tornando a cadeia de hierarquia relativamente grande.

3.3. Análise Custo-Benefício

A consideração da ACB na quantificação da utilidade das obras públicas surgiu no século XIX pelo engenheiro francês Jules Dupuit. Em 1960, o primeiro projeto na área dos transportes em que foi aplicada a ACB corresponde ao projeto da autoestrada M1 no Reino Unido (Falcão Silva e Salvado, 2015).

Este método é útil para avaliar o impacto económico líquido de um projeto de investimento, traduzindo-se num procedimento sistemático para a avaliação de decisões que têm um impacto direto na sociedade. Para além de poder ser utilizada para uma diversidade de intervenções, possibilita estudar a viabilidade de projetos e avaliar os seus impactos com base na comparação dos custos e dos benefícios num determinado horizonte temporal (Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013a).

A metodologia ACB encontra-se estruturada em diferentes fases, como ilustra a Figura 3.1, havendo particular interesse para este trabalho em explorar a fase número 5 (Análise Multicritério).

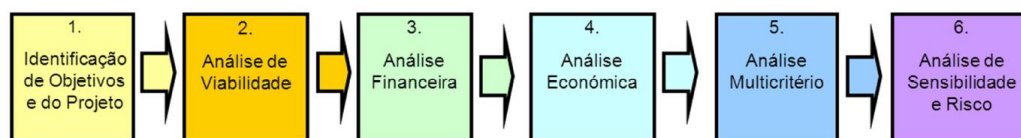


Figura 3.1 - Estruturação da ACB para projetos de investimento (Falcão Silva e Salvado, 2015)

A definição dos objetivos do projeto e do objeto do estudo (**Fase 1**) é essencial à identificação do projeto. Em primeiro lugar há que identificar o projeto e o contexto da sua implementação, e definir claramente os objetivos socioeconómicos a cumprir. Na definição dos objetivos de um projeto devem prever-se os benefícios socioeconómicos da sua execução e os seus indicadores materiais.

O passo da metodologia que se segue (**Fase 2**) corresponde à realização de uma análise que permita garantir, de um ponto de vista técnico, a viabilidade do projeto em estudo. A Análise de Viabilidade de um projeto não se refere apenas à verificação da possibilidade de concretização das diferentes especialidades do projeto, mas implica também, a consideração de aspetos relacionados com marketing, gestão, análise da execução, etc., dado que podem ser adotadas diferentes alternativas para o projeto, tendo em vista os objetivos socioeconómicos identifica-

dos. Para um determinado projeto é necessário verificar se a opção escolhida corresponde à melhor de entre as alternativas possíveis e que foram devidamente ponderadas outras opções.

Segue-se a Análise Financeira (**Fase 3**) cujo objetivo é calcular os indicadores de desempenho financeiro do projeto, sendo usualmente efetuado do ponto de vista do proprietário. Contudo, quando o proprietário e o operador (por exemplo em grandes infraestruturas) não são a mesma entidade, deverá ser considerada a hipótese de ser elaborada uma análise financeira consolidada. A Análise Financeira constitui o ponto de partida para a análise económica subsequente e permite obter a informação necessária em termos de receitas e despesas, seus preços de mercado relativos e como se distribuem ao longo do tempo previsto para a implementação e exploração do projeto. A Análise Financeira tem três finalidades: i) reunir a informação necessária para a análise do *cash-flow*; ii) avaliar a viabilidade financeira do projeto (análise de sustentabilidade); e iii) avaliar os benefícios financeiros calculando a rentabilidade do ponto de vista do investidor privado (retorno financeiro do projeto e do capital).

A Análise Económica (**Fase 4**) fornece informações essenciais sobre a relação entre os fatores de produção e o produto, os seus preços e a estrutura global da programação de receitas e despesas. A Análise Económica é uma etapa essencial numa metodologia baseada em ACB e permite estudar a adequabilidade de um projeto em termos dos valores económicos dos custos e dos benefícios. Esta análise permite passar da perspetiva do investidor privado para o do operador público, relativamente ao projeto em causa, ao considerar o ponto de vista de todas as partes interessadas da sociedade e não apenas o do investidor privado ou dos proprietários das infraestruturas. No final da Análise Económica, deverá ser possível identificar a solução que corresponde à melhor utilização dos recursos, em termos de otimização da relação custo-benefício expressa em termos económicos, ou seja, a que conduzir aos maiores benefícios e a menores custos.

Segue-se a Análise Multicritério (**Fase 5**), um instrumento de apoio à decisão, que ajuda na procura da melhor solução e aplica-se na comparação de projetos alternativos. Este tipo de análise funciona como um suporte à tomada de decisão de situações complexas, permite ter em conta vários critérios em simultâneo e tem por base as expectativas dos decisores, sendo que a participação ativa destes no processo é um dos elementos centrais da abordagem. Com uma AMC podem ser integradas diferentes opções nas ações a tomar pelos decisores (escolhas múltiplas), refletindo opiniões ou interesses de diferentes atores envolvidos num quadro prospetivo (presente-futuro; causa-efeito) ou retrospectivo (presente-passado; efeito-causa). A fase de construção do modelo é essencial para a implementação deste método, pois é tão importante a qualidade da informação disponível quanto o seu tratamento analítico, isto é, o tratamento dado a cada uma das alternativas. A técnica permite conceptualizar uma realidade não estruturada por meio de uma negociação entre os intervenientes e do tratamento explícito dos critérios considerados, possibilitando assim que o analista e o decisor consigam perceber quais as consequências e implicações das ações disponíveis.

Por fim, torna-se necessária a Análise de sensibilidade e risco (**Fase 6**), onde a avaliação dos riscos compreende, para além do estudo da probabilidade de um projeto dar resultados adequados e satisfatórios, a análise da variabilidade do resultado em comparação com a melhor estimativa efetuada à priori. É recomendável que a avaliação de riscos assente: i) numa análise de sensibilidade, que permite avaliar o impacto que as alterações consideradas nas diferentes variáveis que determinam os custos e os benefícios, revelem ter nos índices financeiros e económicos determinados; ii) num estudo complementar da distribuição de probabilidades das variáveis seleccionadas e do cálculo do valor esperado dos indicadores de desempenho da alternativa seleccionada. O objeto da Análise de Sensibilidade é a seleção das variáveis e parâmetros “críticos” do modelo ACB, ou seja, aquelas cujas variações, positivas ou negativas em relação ao valor utilizado como melhor estimativa no caso de referência, têm um efeito mais pronunciado nos parâmetros financeiros e económicos determinados. Após a identificação das variáveis críticas, é necessário, para proceder à análise de risco, associar a cada variável uma distribuição de probabilidades, definida numa gama de valores em torno da melhor estimativa utilizada no caso de referência. No final da Análise de Sensibilidade e Risco é possível obter indicadores de desempenho de projeto que permitem acautelar a tomada de decisão por parte dos intervenientes no processo (Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013a; Falcão Silva e Salvado, 2015).

O facto do método da ACB considerar simultaneamente os efeitos externos e as distorções nos preços observadas conferem-lhe uma vantagem face a outras técnicas de avaliação. Nesta situação, as imperfeições do mercado são explicitamente consideradas. Como pontos fortes destaca-se o facto de uma ACB permitir expressar um juízo sobre a conveniência económico-social de um projeto, assim como estabelecer um *ranking* entre diferentes projetos e incentivar a prática de tentar identificar os custos e benefícios económicos, mesmo que estes não sejam imediatamente convertíveis em unidades monetárias. No entanto, a ACB não tem em linha de conta os efeitos redistributivos (para este fim, pode usar-se a análise multicritério), nem os efeitos do retorno económico de custos ou benefícios não transformáveis em unidades monetárias. Uma terceira limitação corresponde a, por vezes, fazer uso de critérios discricionários para quantificar custos e benefícios para os quais não existe um mercado (Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013a; Falcão Silva e Salvado, 2015).

3.4. Análise Multicritério

No presente subcapítulo pretende-se dar ênfase ao conceito de Análise Multicritério, quais os seus objetivos, os seus pontos fortes e as suas limitações e ainda destacar alguns dos seus métodos, sendo que se dará um especial enfoque ao MACBETH por ser a metodologia a aplicar ao caso de estudo prático.

A AMC retrata o raciocínio e as convicções subjetivas das partes interessadas sobre cada questão em particular, passando por uma fase de estruturação e consequente combinação das diferentes análises consideradas. Assim, o objetivo primordial de uma AMC é auxiliar no pro-

cesso de escolha da solução que melhor satisfaça globalmente os vários critérios em consideração (Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013b).

A AMC é útil para sintetizar opiniões expressadas, para determinar prioridades, para analisar situações de conflito, para formular recomendações de futuras atividades ou proporcionar orientações de natureza operacional. Relativamente ao seu domínio de aplicação pode-se referir que esta é, normalmente, empregue em situações de apoio à tomada de decisões, como por exemplo, na avaliação *ex-ante* de projetos de infraestruturas de transporte (Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013b).

Os métodos de AMC têm origens de famílias distintas, sendo que os mais relevantes tiveram origem na Escola Americana ou Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Utility Theory* - MAUT) ou na Escola Francesa / Europeia ou Métodos de Subordinação e Síntese (LOOTSMA, n.d.; Velasquez e Hester, 2013).

A Escola Americana, baseada na teoria da utilidade e no trabalho desenvolvido por Keeney e Raiffa, foi a linha de pensamento pioneira na decisão multicritério. Os métodos desta escola caracterizam-se por auxiliar o decisor a construir uma função utilidade representativa das suas preferências. Por exemplo, o método MACBETH e o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) são originários desta corrente.

Relativamente à Escola Francesa, Bernard Roy foi o grande impulsionador e os métodos desta caracterizam-se por apresentar duas fases distintas. Numa primeira fase é feita uma comparação entre todas as alternativas, de forma a se estabelecerem relações de classificação. Na segunda fase, essas relações são úteis para se obter uma ordenação das alternativas, uma classificação em categorias ou determinar a melhor alternativa. Os métodos ELECTRE e PROMETHEE são provenientes desta escola (LOOTSMA, n.d.; Velasquez e Hester, 2013).

Para além das diferentes origens, é também de se destacar o propósito de cada um dos métodos, tais como: classificação, ordenação e escolha. Tendo em conta que o problema em questão é a reabilitação de infraestruturas ferroviárias, os métodos multicritério de ordenação de alternativas são os indicados, sendo o MACBETH um desses métodos e o qual será empregue no caso de estudo (Caetano et al., 2018).

De entre os pontos fortes da AMC é de se destacar a possibilidade de incorporar critérios quantitativos e qualitativos (opção fundamental quando a monetarização dos custos e benefícios é difícil ou mesmo impossível), a boa capacidade de lidar com objetivos de difícil comparação e quantificação, a capacidade de contabilizar os valores e opiniões individuais de diversos atores e ainda o bom equilíbrio entre os métodos analíticos e a subjetividade dos atores. O facto de diferentes ponderações se aplicarem à mesma matriz de classificação de impactos contribui para que, em geral, se alcancem conclusões em consenso (Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013b; Direção Geral de Política Regional da Comissão Europeia, 2003).

Existem, contudo, alguns problemas específicos de implementação que poderão limitar a utilização da AMC, ou que poderão requerer a presença de peritos. Um desses casos é quando a

decisão se baseia em vários critérios, normalmente conflituosos. Nestes casos normalmente não é possível encontrar uma alternativa que seja melhor que as outras em todos os critérios simultaneamente, isto é, uma solução ótima. É imprescindível a intervenção do agente de decisão para chegar a uma conclusão, através duma conjugação das suas preferências com os atributos considerados para as várias alternativas. Na AMC raramente existe uma solução ótima, mas sim uma solução ponderada, que pode variar entre agentes de decisão, dependendo da importância que dão a cada critério.

Existem diferentes técnicas de AMC, como por exemplo: i) AHP (Saaty, 2008); ii) ELECTRE (Rogers et al., 2000); iii) PROMETHEE (Brans, 1982); iv) MACBETH (Bana e Costa et al., 2003, 2017; Bana E Costa et al., 2012; Bana e Costa et al., 2010; Costa e Vansnick, 1995).

Observando a Figura 3.2, pelo menos sete tipos de aplicações de AMC podem ser identificados na gestão de infraestruturas (Caetano et al., 2018; Kabir et al., 2014): i) Sistemas de recursos hídricos (recursos hídricos como bacias hidrográficas e barragens); ii) Rede de água e de esgotos (gestão de água potável e residual); iii) Transporte em rodovias, pavimentação, autoestradas, ferrovias e trânsito; iv) Pontes (projeto, construção, manutenção, avaliação e gestão); v) Edifícios (problemas estruturais); vi) Infraestrutura subterrânea (gestão de infraestruturas subterrâneas, tais como gasodutos, oleodutos, túneis e redes metropolitanas); vii) Outros associados a aplicações em infraestrutura urbana, sistemas de drenagem urbana, plantas de refinaria *offshore*, infraestrutura crítica, entre outros.

Área de aplicação	WSM	AHP	ELECTRE	PROMETHEE	CP	TOPSIS	VIKOR	Métodos combinados	Total
Sistemas de recursos hídricos	3	5	3	9	8	1	3	36	68
Rede de água e de esgotos	2	15	8	7	4	1	1	15	53
Transportes	2	30	5	1	0	4	0	14	56
Pontes	0	7	0	0	0	0	0	51	58
Edifícios	1	5	2	1	1	5	2	16	33
Infraestrutura subterrânea	1	4	1	1	1	0	0	3	11
Outros	1	6	0	0	0	5	0	9	21
Total	10	72	19	19	14	16	6	144	330

Figura 3.2 - Distribuição de documentos AMC por métodos e aplicações (adaptado de Kabir et al., 2014)

O número total de artigos que utilizaram um dos métodos AMC aumentou de um dígito no início dos anos 80 para centenas no final dos anos 2000 (Figura 3.3). No entanto, a fração de papéis de AMC dentro de documentos de infraestrutura (incluindo transporte) está em constante crescimento (Kabir et al., 2014).

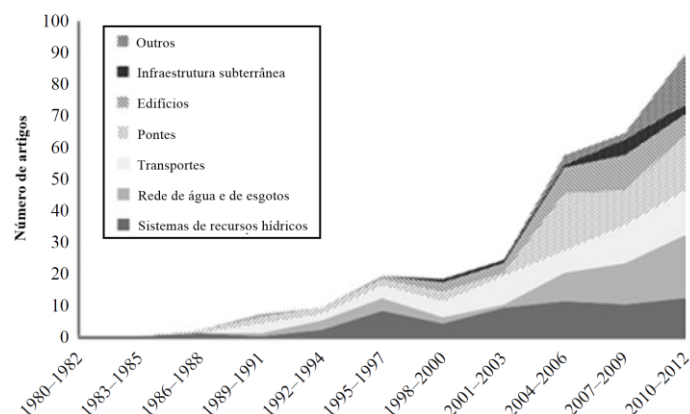


Figura 3.3 - Distribuição e crescimento de artigos AMC por setores entre 1980 e 2012 (adaptado de Kabir et al., 2014)

A aplicação da AMC no sector dos transportes apresenta um alcance muito amplo, desde a avaliação das medidas políticas em transporte de passageiros (Bouwman e Moll, 2002), decisões estratégicas (Bouwman e Moll, 2002; Dooms e Macharis, 2006; Kabir et al., 2014; Vreeker et al., 2002), tecnologias (Macharis et al., 2004; Tzeng et al., 2005), locais (Macharis, 2000; Sirikijpanichkul e Ferreira, 2005) e, finalmente, projetos de infraestrutura (De Brucker, 1998). Considerando os diferentes tipos de infraestrutura, a AMC é maioritariamente aplicada à rodovia (Caetano et al., 2018). De seguida, realizou-se uma pesquisa bibliográfica relativamente à aplicação de técnicas de AMC às infraestruturas ferroviárias, apresentada em resumo na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Aplicação de técnicas de AMC às infraestruturas ferroviárias (Caetano et al., 2018)

Tópico estudado	Técnica AMC adotada	Referências
Análise da qualidade do serviço ferroviário e risco de segurança no trânsito	WSA, AHP, TOPSIS, DEA e VIKOR	An et al. (2011); Aydin (2017); Bureika et al. (2013); Celik et al. (2014); Chen et al. (2014); Eboli e Mazzulla (2013); Gerçek et al. (2004); Longo et al. (2012); Maskeliūnaite et al. (2009); Maskeliūnaite e Sivilevicius (2011); Nathanail (2008); Sameni et al. (2016); Sivilevičius e Maskeliūnaite (2010); Yong et al. (2016)
Planeamento e projeto de ferrovias	WSM, AHP, ELECTRE, MAMCA, MACBETH, COSIMA e VIKOR	Ambrasaitė et al. (2011); De Luca et al. (2012); Kosijer et al. (2012); Markovic et al. (2012); Mateus et al. (2008); Nedevska et al. (2017); Saat e Aguilar Serrano (2015)
Seleção de medidas de manutenção	AHP, ANP	Filippo et al. (2007); Moazami et al. (2011); Montesinos-Valera et al. (2017); Nyström e Söderholm (2010); Tamirat (2014)

Impacto do transporte no meio ambiente	Mixed	Janssen (2001)
Seleção de fornecedores em projetos ferroviários	AHP	Polat e Eray (2015)
Análise de risco de acidentes	AHP	Jiang et al. (2015)
Seleção do esquema de projeto de vagões	AHP	Li (2009)
Seleção de fabricante de veículos ferroviários	AHP	Dhir et al. (2015)
Seleção de equipamentos para travessia nas estações	PROMETHEE	Čaiko et al. (2008)

Após analisar as fontes citadas acima, conclui-se que o método AMC mais utilizado na resolução de problemas de infraestrutura ferroviária é o AHP. Note-se que o método AHP possui algumas semelhanças com o MACBETH, aspecto que se aborda no subcapítulo 3.6. Todavia, também é notável que a área da reparação, manutenção e reabilitação possui (ainda) um número escasso de estudos com a colaboração AMC (Caetano et al., 2018).

3.5. MACBETH

O acrônimo MACBETH resulta de “*Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique*”, o que pode ser traduzido como: medição da atratividade por uma técnica de avaliação baseada em categorias. Esta técnica foi originada na década de 90 e tem a autoria de Carlos Bana e Costa e Jean-Claude Vansnick, tendo mais tarde Jean-Marie De Corte unido-se ao projeto (Bana e Costa et al., 2013, 2003).

Para um dado problema, o MACBETH apoia-se na análise de juízos qualitativos para a construção dum modelo de avaliação quantitativo de valores. Este permite quantificar o grau de preferência que o decisor tem sobre um conjunto de alternativas. Neste sentido, são oferecidas sugestões à medida que é analisada a inconsistência dos resultados, possibilitando assim a sua revisão. Esta abordagem facilita o caminho da ordenação ordinal para a modelação de preferência cardinal, sendo uma mais-valia para o decisor quantificar o interesse das opções existentes (Bana e Costa et al., 2013, 2003; Bana e Costa et al., 2012; Costa e Vansnick, 1995).

A abordagem MACBETH assenta num modelo de agregação de valor aditivo simples. Um modelo aditivo simples caracteriza-se por ser amplamente conhecido e pela sua simplicidade, isto é, pela sua precisão no processamento da importância relativa entre critérios, por evitar complicações no processo das agregações ordinais e ainda por abranger parâmetros técnicos de

fácil interpretação e explicação. No entanto, de modo a facilitar a sua implementação prática e a serem gerados resultados matematicamente significativos é essencial que os decisores disponham de boas informações (Bana e Costa et al., 2003).

A sua aplicação considera uma avaliação parcial, seguida de uma avaliação global. A avaliação parcial é obtida com a definição de funções de valor ou escalas de preferências para avaliar o desempenho das opções em cada um dos critérios. A avaliação global surge com o somatório da aplicação de coeficientes de ponderação (pesos) a essas mesmas avaliações parciais.

Pode afirmar-se que o MACBETH assenta numa abordagem humanista, interativa e construtiva: humanista porque ajuda os decisores a avaliar, comunicar e debater os seus sistemas e preferências de valores; interativa porque o processo de reflexão e de aprendizagem é facilitado, especialmente no âmbito sociotécnico em que são empregues protocolos simples de pergunta-resposta. Outra razão reside na metodologia MACBETH ser suportada pelo seu próprio *software* M-MACBETH, extremamente eficiente e de fácil utilização; construtiva, na medida em que a metodologia ajuda no caminhar da tomada de decisão em conjunto, sendo que no início do processo existem diferentes opções possíveis para resolver o problema (Bana e Costa et al., 2003).

O MACBETH distingue-se dos restantes métodos de AMC fundamentalmente por ponderar os critérios e avaliar as opções, necessitando apenas de julgamentos qualitativos sobre a diferença de atratividade entre dois elementos por vez, isto é, trata-se de um método que utiliza escalas ordinais por intervalo (Bana e Costa et al., 2013). As sete categorias semânticas de diferença de atratividade do MACBETH são: nula, muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte e extrema. Estas são introduzidas em matrizes que garantem a consistência das mesmas (Costa e Vansnick, 1995; Salvado et al., 2017).

De uma forma simplista e em qualquer modelo de AMC, o primeiro passo destina-se à estruturação do problema. De seguida, introduzem-se os dados numa matriz de avaliação. Se a matriz for suficientemente consistente, a atratividade pode ser calculada, caso contrário impõe-se a revisão dos julgamentos. Finalmente, recomenda-se uma análise de sensibilidade opcional. Esta sequência de trabalhos encontra-se esquematizada na Figura 3.4 e apresentada em detalhe mais adiante.

ESTRUTURAÇÃO	AVALIAÇÃO	RECOMENDAÇÕES
Crítérios	Pontuação	Análise de resultados
Opções	Ponderação	Análises de sensibilidade

Figura 3.4 – Etapas da metodologia MACBETH (Bana e Costa et al., 2017)

“A estruturação adequada permite estabelecer uma linguagem comum de argumentação e discussão das perspectivas e pontos de vista defendidos pelos diversos atores intervenientes, facilitando e estimulando a geração de novas oportunidades de decisão e alternativas de escolha tendentes a ultrapassar divergências de pontos de vista. Do processo de estruturação deve resultar uma base operacional bem definida para ajudar o analista a ajudar o decisor e demais atores a identificar os pontos de vista fundamentais e a operacionalizar os critérios para avaliar os impactos das opções e comparar os seus prós e contras.” (Bana e Costa e Beinat, 2010).

A aplicação da metodologia MACBETH passa pelo seguinte conjunto de etapas, mais ou menos aplicável e ajustável a todas as tomadas de decisão (Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013b; Direção Geral de Política Regional da Comissão Europeia, 2003; Dodgson et al., 2009; Macharis et al., 2009): i) enquadramento; ii) definição das alternativas; iii) identificação dos objetivos e dos critérios; iv) avaliação de cada alternativa relativamente a cada um dos critérios; v) obtenção dos pesos dos critérios; vi) obtenção dos pesos finais de cada alternativa; vii) análise dos resultados; viii) análises de sensibilidade no peso e de robustez.

O **enquadramento** é uma fase de identificação das características principais do contexto de decisão e estabelecimento do âmbito e dos limites da análise (Bana e Costa e Beinat, 2010). Com a identificação dos intervenientes é possível partir para a interação entre estes, isto é, para a questão: “Qual é o problema?” (Rosenhead, 1996). O processo de **definição das alternativas** é por vezes dos passos mais difíceis num processo de tomada de decisão. A fase de **identificação dos objetivos e dos critérios** consiste na explicação de cada opção tendo em consideração cada critério. Os objetivos devem ser expressos em variáveis mensuráveis e não devem ser redundantes (Direção Geral de Política Regional da Comissão Europeia, 2003). Os critérios escolhidos devem representar a missão desejada ou o objetivo final dos decisores (Rogers et al., 2000). A elaboração da família de critérios é uma fase fundamental do processo de tomada de decisão, uma vez que é através destes que uma alternativa será preferida em detrimento de outra (Dodgson et al., 2009). Uma das formas de caminhar no sentido de organizar os critérios, agrupando-os em objetivos de alto e baixo nível é utilizando uma abordagem hierárquica, como por exemplo através de uma árvore de valores. Esta abordagem, defendida por Belton e Vickers, assenta em construir critérios através da decomposição de um ponto de vista único em subpontos de vista que são novamente decompostos, alcançando-se assim pontos de vista relevantes (Rogers et al., 2000). **Avaliar** o desempenho esperado de **cada alternativa relativamente aos critérios**, isto é, valorizar as alternativas em cada critério tendo em conta as consequências das opções. No fim desta fase deve-se verificar a consistência das pontuações em cada critério, isto é, deve-se avaliar o valor associado às consequências de cada opção para cada critério. São necessários dois níveis de referência mínimos para serem identificados como nível de referência superior (bom) e nível de referência inferior (neutro). Por defeito, na escala MACBETH, o nível de referência superior tem uma pontuação de 100, enquanto o nível de referência inferior tem uma pontuação de 0. De notar que, 100 não representa necessariamente a melhor pontuação possível e 0 não indica o pior desempenho de uma alternativa para um dado critério. Tendo em conta que nem todos os critérios acrescentam valor de forma igual, torna-se relevante **medir a**

importância relativa dos critérios na decisão final (pesos dos critérios). Esta distinção é realizada através da atribuição de pesos para cada um dos critérios e a sua obtenção é feita de forma semelhante à valoração dos critérios. Assim, é requerido um cuidado especial nesta fase, pois estes pesos poderão ter um grande impacto na decisão final, pelo que deverão ser o mais consistentes possível e representativos da realidade no contexto do problema. A **obtenção dos pesos finais de cada alternativa** consiste em combinar os pesos e as pontuações para cada opção de modo a obter um valor geral final de cada alternativa. Numa primeira fase, calculam-se as pontuações ponderadas globais em cada nível na hierarquia. Após isso, está-se em condições de calcular as pontuações ponderadas em geral. Com base nessas pontuações médias ponderadas, a equipa de avaliação pode classificar as medidas por ordem de contribuição para o sucesso global do programa. A elaboração da AMC fornece uma comparação de diferentes alternativas estratégicas (**análise dos resultados**), e apoia o decisor a tomar a sua decisão final, indicando quais os elementos (de cada parte interessada) que têm um impacto claramente positivo ou claramente negativo na sustentabilidade do sistema (Macharis et al., 2009). A **análise de sensibilidade aos pesos** surge, neste contexto, para avaliar o impacto no resultado global da alteração dos *inputs* iniciais. Esta análise permite contemplar as hesitações manifestadas pelos decisores e possibilita a criação de novas opções que possam ser melhores do que as inicialmente consideradas no modelo de decisão. Para tal, é necessário verificar se existem outras preferências ou pesos que afetem a ordenação geral das opções e reconhecer as vantagens e desvantagens dessas mesmas opções. Esta análise pode ser repetida até se obter um modelo totalmente funcional. A **análise de robustez** caracteriza-se por tratar em simultâneo os coeficientes de ponderação dos critérios, contrariamente ao que acontece com a análise de sensibilidade (onde só varia o peso de um critério e se mantém constantes os demais).

A metodologia MACBETH possui um *software* de apoio designado M-MACBETH que permite verificar a consistência dos juízos atribuídos, alertar caso sejam detetadas inconsistências e, nesse caso, sugere recomendações por forma a tornar todos os julgamentos consistentes. De realçar que o conjunto de julgamentos é inconsistente quando não existe solução possível para este problema, isto é, é impossível associar um valor numérico a cada julgamento. Com todas as matrizes de julgamentos definidas e não existindo inconsistências, o próximo passo corresponde à criação de funções de valor e escalas de preferência por parte do *software*. Cabe ao decisor organizar os critérios por ordem decrescente de atratividade para que seja possível o processo de atribuição de coeficientes de ponderação. Também nesta fase o *software* verifica a consistência dos dados introduzidos, sugerindo correções caso seja necessário. Concluída esta fase e feita a análise e validação por parte do decisor, são obtidas as pontuações globais. Uma das maiores vantagens do uso do *software* M-MACBETH é que, além de permitir uma avaliação global, permite analisar quanto cada candidato é fraco ou forte em cada critério. Por fim, é de se destacar a capacidade do *software* realizar análises de sensibilidade e robustez (Bana e Costa et al., 2003; Ishizaka e Nemery, 2013; Karande e Chakraborty, 2014).

As etapas genéricas referidas anteriormente para a metodologia MACBETH aplicadas ao presente caso de estudo encontram-se no subcapítulo 5.3. Estas mesmas podem ser concretiza-

das no *software* M-MACBETH da forma esquemática apresentada em Bana e Costa et al. (2017) e, para o caso de estudo da presente dissertação, encontram-se no subcapítulo 5.4.

3.6. Comparação entre AHP e MACBETH

As duas metodologias, sendo parte integrante da corrente AMC, têm muitos pontos em comum. Com efeito, ambas se socorrem da estruturação do problema em questão através de uma árvore de critérios e comparam as diferentes alternativas através da atribuição de julgamentos aos mesmos. No entanto, reside neste ponto uma das diferenças mais evidentes entre os dois métodos. Enquanto no MACBETH os julgamentos são referentes às diferenças de atratividade entre as diferentes opções, o AHP envolve rácios de prioridade ou importância para determinar a ordem de preferência das alternativas. A condição de preservação de ordem de preferência das alternativas, exigida pelo AHP, nem sempre é cumprida, o que constitui uma limitação óbvia do modelo (Bana e Costa et al., 2013; Bana e Costa e Vansnick, 2008).

Outro aspeto relevante relacionado com o AHP prende-se com o índice de consistência. Somente valores iguais ou inferiores a 0,1 para um índice de consistência de uma matriz de julgamentos são considerados aceitáveis. Ora, este facto pode de certa forma limitar a atribuição de julgamentos e não refletir de forma exata as preferências do decisor, visto que este pode ser obrigado a alterar os seus julgamentos caso se depare com situações em que o índice de consistência verificado seja superior a 0,1.

Outra limitação que se evidencia na aplicação do AHP é a inconsistência que se pode gerar ao utilizar a escala numérica definida. Por exemplo: se uma opção X é 5 vezes mais importante que Y, e Y é 5 vezes mais importante que Z, então X é 25 vezes mais importante que Z, o que constitui uma incongruência grave dado que a escala só é possível num intervalo de 1 a 9. Dado que a utilização do MACBETH envolve apenas a atribuição de julgamentos qualitativos, aqui reside uma das grandes vantagens desta metodologia relativamente ao AHP.

	Categoria	AHP	MACBETH
Semelhanças	Modelo MCDA	Modelo de mensuração de valor	
	Estrutura	1. Hierarquia de decisão 2. Comparações por pares 3. Verificação de Consistência 4. Derivação de pesos e prioridades 5. Síntese de pesos e prioridades 6. Interpretação de resultados 7. Análise sensitiva	
Diferenças	Hierarquia de decisão	Subcritérios avaliados em relação aos critérios	Apenas um nível de critério é avaliado
	Número de comparações par-a-par	Menor (em caso de subcritérios)	Maior (em caso de subcritérios)
	Julgamentos	Relação de importância/prioridade/preferência	Diferença de atratividade
	Escala	Escala fundamental de 9 pontos (escala de proporção)	6 categorias semânticas (escala ordinal)
	Verificação de consistência	Inconsistência de 10% aceite	Nenhuma inconsistência aceite
	Cálculo de prioridades e pesos	Método de valor próprio	Programação linear
	Soma de prioridades	Modo distributivo: 1 Modo ideal: $\neq 1$	Em geral: $\neq 1$
	Interpretação dos pesos dos critérios	Importância dos critérios ou importância da mudança no desempenho médio	Importância da mudança especificada no desempenho (por exemplo, de níveis definidos anteriormente; por exemplo, neutro e bom)
	Aplicação nos cuidados de saúde	Frequentemente	Apenas em alguns problemas relacionados com a saúde
	Software de apoio ao grupo de decisão	Sim (escolha da equipa responsável)	Não (apenas negociações / discussões possíveis com o M-MACBETH)
	Críticas	Numerosas críticas ao longo das últimas décadas	Apenas críticas muito limitadas

Figura 3.5 – Semelhanças e diferenças entre as técnicas AHP e MACBETH (adaptado de Rietkötter, 2014)

Após analisar as principais semelhanças e diferenças entre as técnicas AHP e MACBETH ilustradas na Figura 3.5, a opção pela utilização do MACBETH ao invés do AHP, prende-se essencialmente com o facto de:

- Requer apenas julgamentos qualitativos, o que introduz maior simplicidade no método e também permite captar melhor o conhecimento subjetivo;
- O MACBETH permite a criação de indicadores com valor intrínseco e não apenas valor relativo, o que retira ambiguidade ao resultado final produzido e permite um balizamento da complexidade de um projeto muito mais realista e com menor erro;
- A componente sociotécnica do MACBETH torna-o na ferramenta mais adequada para captar o *know-how* de especialistas (por exemplo, em conferências de decisão);
- O AHP apresenta os problemas de inconsistência já identificados (Rietkötter, 2014) e, também por Bana e Costa e Vansnick (2008), o que o torna uma ferramenta menos robusta para o fim em vista.

3.7. Considerações finais

Na área das infraestruturas ferroviárias, o contexto específico de cada linha férrea associado aos constrangimentos económicos, ao aumento das exigências do seu funcionamento e à complexidade da sua gestão, tem vindo a tornar as ferramentas de apoio à decisão cada vez mais importantes e necessárias para as entidades gestoras destes sistemas fundamentarem as suas decisões de forma eficiente e sustentável.

Com a utilização de uma metodologia de AMC é possível incluir as várias partes interessadas, os seus pontos de vista e os vários critérios para a avaliação de projetos, de novas tecnologias, entre outros. Desta forma, todos os intervenientes podem compreender melhor os objetivos das partes interessadas. Isto motiva as partes interessadas a realizarem avaliações adequadas e, por vezes, a alterar a sua forma de pensar (Macharis et al., 2009).

Seguidamente, identificaram-se as fases que compõem a avaliação das ações em causa, passando-se à apresentação de alguns conceitos importantes no processo. Foi realçado que a metodologia MACBETH se enquadra no domínio da AMC, seguindo uma postura construtivista, em que a sua aplicação recorre à construção de escalas numéricas de intervalos, entendidas como necessárias para a definição de ponderadores entre os critérios de avaliação. Na prática, não se procedeu a uma análise exaustiva de modelos matemáticos que suportam a metodologia, defendendo-se, antes, o entendimento de que deverá funcionar como ferramenta para ultrapassar eventuais problemas operacionais na construção de um modelo de avaliação. Sendo uma técnica baseada em procedimentos de pergunta-resposta direta, onde os decisores comparam pares de ações de forma qualitativa com base na diferença de atratividade existente entre as ações, o procedimento técnico passa pelo preenchimento de matrizes de julgamentos de valor, até que seja definida uma escala de preferência local para cada um dos descritores presentes no modelo. Identificaram-se também algumas das vantagens e limitações da abordagem MACBETH. Com efeito, identificaram-se as seguintes vantagens da metodologia: o facto de ser interativa, dinâmica, promover a aprendizagem, ser aplicável em diversas áreas e ser flexível e de simples aplicação. Por outro lado, foram apontadas algumas limitações, como o facto do número de comparações e/ou de julgamentos de atratividade poder ser elevado e tornar o processo muito saturado. Por último, realizou-se uma comparação com um dos métodos mais “próximos” do MACBETH, o AHP, por forma a consolidar a apropriação do primeiro para o caso de estudo a realizar.

4. Monitorização e Reabilitação

Em geral, os processos de manutenção, reparação, renovação e reabilitação da infraestrutura ferroviária são realizados com vista a devolver à mesma, na melhor das hipóteses, as suas características iniciais.

O termo reabilitação designa toda a série de ações empreendidas com vista à recuperação e beneficiação de uma estrutura, tornando-a apta para o seu uso atual. De uma forma geral, reabilitar consiste em reequacionar uma realidade. O seu objetivo fundamental consiste em resolver as deficiências físicas e as anomalias construtivas, ambientais e funcionais acumuladas ao longo do tempo. Ao mesmo tempo procura-se uma modernização e uma beneficiação geral dessa mesma estrutura, melhorando o seu desempenho funcional face às exigências ou condicionamentos atuais (Aguilar et al., 2002).

Às linhas ferroviárias estão associados investimentos de longa duração, visto que é necessária bastante intervenção a nível da manutenção por forma a que uma determinada infraestrutura ferroviária verifique, principalmente, as seguintes condições (Berggren, 2009; Tzanakakis, 2013): i) segurança (baixa probabilidade de acidentes); ii) conforto (para os passageiros e carga, associados a um ambiente de baixo ruído e vibração); iii) disponibilidade (sem falhas e/ou restrições de velocidade devido à segurança, etc.); iv) economia (é imprescindível um adequado planeamento de monitorização, inspeção e manutenção). A título de exemplo, uma via-férrea com baixa qualidade é económica, pela falta de manutenção, visto a sua deterioração e do material circulante serem maiores. No entanto, quanto maior o intervalo de tempo sem intervenção, maiores serão os riscos e custos inerentes.

Atualmente, muitas dessas linhas têm mais de 100 anos, sendo claro que alguns dos seus componentes foram substituídos ou reparados durante os anos, mas algumas outras partes podem permanecer as mesmas – especialmente a subestrutura. Considerando a tendência clara para se praticarem velocidades mais elevadas, circular um maior número de comboios, bem como uma maior capacidade de carga associada aos mesmos, exige-se um maior esforço no campo da manutenção por forma a assegurar as condições de segurança, conforto, disponibilidade e economia. Nesse sentido, há também uma tendência para a redução do tempo de manutenção e uma redução de disponibilidade financeira para essa mesma manutenção devidos à competição com outros meios de transporte. Com isto, pode-se constatar que uma parte significativa do orçamento de um proprietário de infraestrutura ferroviária será dedicada à sua manutenção (Berggren, 2009).

A manutenção pode ser definida como sendo “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo ações de supervisão, destinadas a reter um item ou restaurá-lo em um estado no qual ele possa desempenhar uma função requerida” ou “...um conjunto de atividades organizadas que são realizadas para manter um item na melhor condição operacional associado a um custo mínimo adquirido” (Tzanakakis, 2013).

A política de manutenção estabelece uma base mínima de qualidade para as características da via, do material e do tráfego a que a linha está sujeita.

Além dos custos associados, as decisões de manutenção baseiam-se na confiabilidade da análise dos resultados provenientes das inspeções e ainda na disponibilidade de recursos, tais como materiais, máquinas e operadores (Fontul, 2017).

A recuperação da qualidade geométrica da via é conseguida através da realização de ações de intervenção, cujo objetivo primordial, após a construção da via-férrea, é garantir o nível de serviço da via para o qual foi projetada, isto é, garantir a qualidade geométrica da via e do estado do material, de forma a permitir um nível de segurança e de conforto elevado, dentro dos limites de tolerância admissíveis (Goossens, 2010; Vale, 2010).

De entre os vários tipos de intervenção, é possível observar na Figura 4.1 um exemplo prático que demonstra que a maior fatia orçamental é destinada às ações de renovação e reabilitação nos Países Baixos.

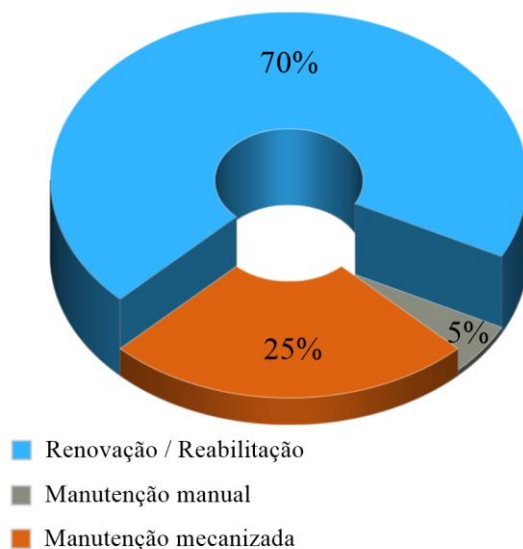


Figura 4.1 – Diagrama representativo da despesa anual total dedicada à manutenção e renovação/reabilitação de ferrovias holandesas (considerando o nível de preços do ano 2000) [adaptado de Esvelt, 2001]

4.1. Entidade gestora da rede ferroviária nacional, sua organização, gestão e atuação

Este subcapítulo tem como objetivos identificar e caracterizar a organização, gestão e o modo de atuação das entidades gestoras da rede ferroviária nacional (RFN).

A gestão da manutenção da RFN está atualmente ao cargo da entidade Infraestruturas de Portugal, antiga REFER.

O princípio do caminho-de-ferro em Portugal foi um dos mais importantes acontecimentos da época. Desde lá, muitos são os marcos que assinala na história dos transportes. A CP (Comboios de Portugal, E.P.E.) é uma empresa portuguesa de transporte ferroviário criada em 11 de maio de 1860 com o nome de Companhia Real dos Caminhos-de-Ferro Portugueses. No ano de 1997, na sequência da introdução de um novo quadro legal, foi operada uma profunda transformação no sector ferroviário. A CP passou a ser responsável pela operação, assumindo a REFER - Rede Ferroviária Nacional, EP a gestão da infraestrutura.

A REFER foi criada em 1997, pelo Decreto-Lei n.º 104/97, de 29 de abril, como empresa pública responsável pela prestação do serviço público de gestão da infraestrutura integrante da RFN. Em 22 de julho de 2008, o Decreto-Lei n.º 141/2008 altera a denominação da REFER para Rede Ferroviária Nacional - REFER, EPE e introduz alterações aos seus estatutos, procedendo à sua republicação. A 1 de junho de 2015, na sequência do Decreto-Lei n.º 91/2015 de 29 de Maio, a Rede Ferroviária Nacional – REFER, E.P.E. (REFER, E.P.E.) incorpora, por fusão, a EP - Estradas de Portugal, S.A. (EP, S.A.) e é transformada em sociedade anónima, passando a denominar-se Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP, S.A.), cujo organigrama se encontra ilustrado na Figura 4.2 (Infraestruturas de Portugal, 2018b).

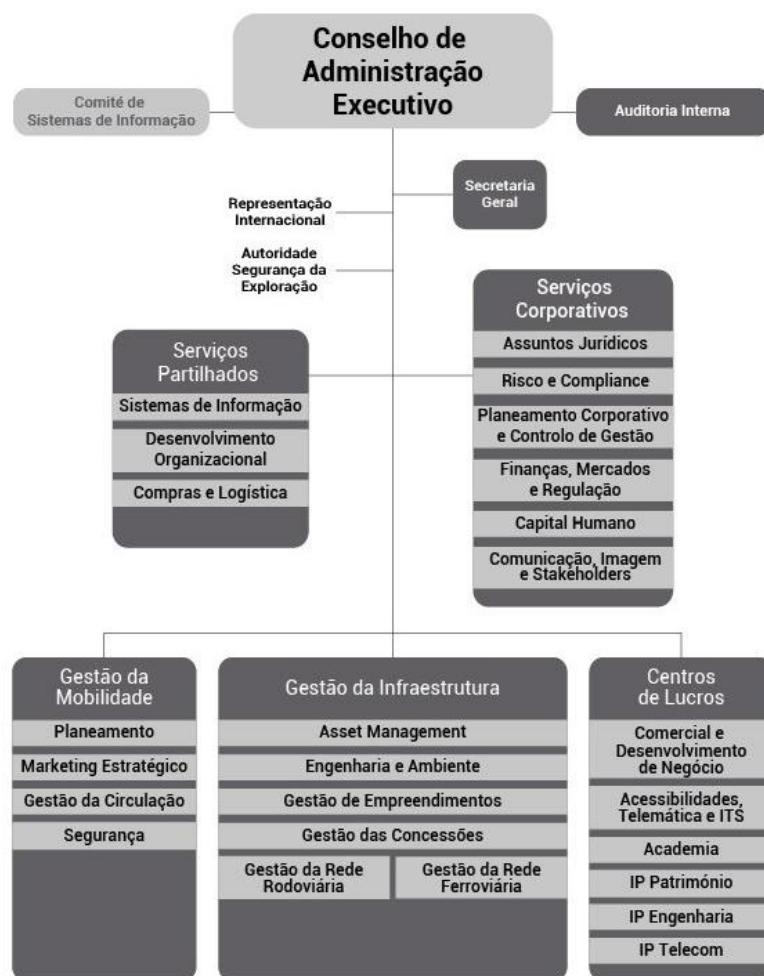


Figura 4.2 – Organograma da IP, S.A. (Infraestruturas de Portugal, 2018b)

Atualmente, a IP tem por obrigação a prestação do serviço público de gestão da infraestrutura integrante da RFN, nos termos em que nela foi delegada através do Decreto-Lei 104/97, de 29 de abril. Incluem-se nas obrigações de serviço público de gestão da infraestrutura integrante da RFN: i) a gestão da capacidade da infraestrutura ferroviária; ii) o comando e controlo da circulação; iii) a manutenção da infraestrutura ferroviária; iv) a promoção, coordenação, desenvolvimento e controlo de todas as atividades relacionadas com a infraestrutura ferroviária. A IP deve disponibilizar aos operadores ferroviários a capacidade da infraestrutura da RFN, garantindo condições de qualidade, fiabilidade e segurança da exploração (Infraestruturas de Portugal, 2018b).

Em termos operacionais, o país encontra-se dividido em três regiões distintas (Norte, Centro e Sul), cada uma com vários centros de manutenção, que têm como principal função desenvolver ou fiscalizar as ações de manutenção.

Para além de garantir a fiabilidade e a segurança da circulação ferroviária, as atividades de manutenção da infraestrutura são uma preocupação da empresa, na medida em que esta assegura a satisfação dos mais exigentes requisitos de qualidade e aposta na inovação e melhoria permanentes. Estas atividades são asseguradas através de um planeamento estratégico, com a finalidade de garantir a normalização das intervenções e procedimentos, assim como a monitorização do cumprimento desses planos (Infraestruturas de Portugal, 2018b).

A IP divide as operações de manutenção em três tipos distintos: manutenção preventiva sistemática, manutenção preventiva condicionada e manutenção corretiva. A manutenção preventiva sistemática compreende inspeções semanais, inspeções mensais, inspeção com veículo de registo contínuo e inspeções ultrassónicas de carris. A manutenção preventiva condicionada integra trabalhos de reabilitação planeados em função dos resultados obtidos nos trabalhos de manutenção preventiva sistemática e, por fim, a manutenção corretiva é destinada à correção de anomalias que necessitam de intervenção imediata (Infraestruturas de Portugal, 2018b).

A IP divide as ações de conservação em três grandes grupos: i) revisão periódica; ii) intervenção pontual; iii) renovação. A revisão periódica é uma operação que se baseia na verificação de todos os elementos deterioráveis da via, reparação e eventual substituição dos que se apresentarem degradados. Posteriormente segue-se a passagem de equipamentos de nivelamento e alinhamento da via. Assim sendo, esta contempla as atividades de prospeção, previsão da quantidade de trabalho, código dos trabalhos e o programa anual de trabalhos. A intervenção pontual tem a finalidade de corrigir anomalias que não podem aguardar até à próxima revisão periódica. Por fim, a renovação caracteriza-se pelo conjunto de tarefas que tem por objetivo a substituição total ou parcial dos materiais da via, com ou sem ajustamentos do seu traçado (Infraestruturas de Portugal, 2018b).

Em suma, apresentam-se os parâmetros de segurança ferroviária necessários para a definição das medidas de segurança a considerar em trabalhos na infraestrutura ou na sua proximidade (Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, IP, 2009): i) velocidades máximas para a realização de trabalhos; ii) zonas de risco; iii) distâncias de anúncio; iv) meios humanos e materiais; v) natureza dos trabalhos; vi) zonas de proteção; vii) acesso ao local dos trabalhos.

4.2. Inspeção e Monitorização da via

Como já referido, a Infraestruturas de Portugal, S.A. é a entidade responsável pelas redes rodoviária e ferroviária nacionais, estando a seu cargo a realização das inspeções que caracterizam o estado da via.

A inspeção de infraestruturas ferroviárias faz parte da materialização do plano de monitorização e, como tal, são essenciais para implementar a fase de monitorização do ciclo de vida da estrutura. Assim, é importante fazer a distinção entre dois conceitos intrinsecamente relacionados: inspeção e monitorização.

Entende-se por inspeção o conjunto de ações necessárias para coletar dados sobre a condição da infraestrutura por meio de inspeção visual, pesquisas e equipamentos intrusivos e não intrusivos. A condição da infraestrutura ferroviária é avaliada com base no seu estado de deterioração e de segurança estrutural. Existem vários tipos de inspeção, dependendo do ciclo de vida do trabalho e das metas: inspeção de um novo trabalho, inspeção básica, inspeção de rotina, inspeção pré-intervenção, inspeção pós-intervenção, inspeção extraordinária e após acidente.

As atividades de inspeção da via permitem proceder aos levantamentos das necessidades da via, no que respeita a (Fontul, 2017): i) substituição de materiais; ii) correção da geometria da via; iii) execução de limpezas da via; iv) lubrificações periódicas que garantam a segurança, fiabilidade e disponibilidade da infraestrutura.

A inspeção de via é efetuada através de veículos próprios para o efeito, podendo ser uma carruagem que é acoplada a um comboio num serviço regular, pequenos veículos autopropulsionados, ou até mesmo um comboio de várias carruagens, como é recorrente nas linhas de alta velocidade (Dantas, 2014). Outro aspeto a reter é que a frequência das inspeções e testes depende do tipo de tráfego na linha (somente tráfego de passageiros ou tráfego misto) e da categoria UIC da linha.

Por outro lado, “a monitorização da infraestrutura corresponde à avaliação contínua ou periódica da condição dos componentes e/ou subsistemas da infraestrutura” (UIC 719R, 2008). A monitorização inclui não só as inspeções, mas também o armazenamento e o processamento dos dados recolhidos para recomendar ou não a necessidade de intervir.

As técnicas e procedimentos aplicados na monitorização das zonas de transição são, em geral, idênticos aos da plena via. De entre essas técnicas, destacam-se as que têm maior interesse (Ribeiro, 2012): i) determinação de deslocamentos dinâmicos na via para a passagem de tráfego ferroviário; ii) instalação de acelerómetros ou geofones no carril e travessas; iii) determinação de cargas dinâmicas e reação sob as travessas através da instrumentação do carril com extensómetros (como por exemplo nos projetos Europeus SUPERTRACK e INNOTRACK); iv) determinação das tensões (verticais e de confinamento) e a sua variação em profundidade, nas diferentes camadas da via; v) monitorização dos veículos em movimento recorrendo a acelerómetros estrategicamente colocados.

Para a finalidade deste trabalho interessa referir a vantagem existente com o armazenamento dos dados recolhidos, permitindo uma previsão dos acontecimentos. Neste sentido, a monitorização assume um papel essencial no planeamento da conservação das infraestruturas. Não obstante, a monitorização da qualidade geométrica da via consiste na avaliação e caracterização dos seus parâmetros geométricos, aspetos esses abordados no seguinte subcapítulo. Esta deve ser realizada periodicamente por um veículo de inspeção geométrica da via, cuja constituição e funcionamento se encontram descritos em detalhe no subcapítulo 4.2.2.

4.2.1. Parâmetros geométricos da via

A qualidade de uma via-férrea para comboios de passageiros comporta dois aspetos (Fortunato, 2005): i) a qualidade relacionada com parâmetros de conforto e com parâmetros de segurança, a qual depende do traçado e dos parâmetros geométricos adotados; ii) a qualidade resultante das características dos materiais utilizados e da adequada execução dos trabalhos de construção da via.

A análise da evolução dos parâmetros geométricos da via permite identificar quer zonas de mau desempenho, quer a variação do estado de uma determinada zona com o tempo.

Como referido, a medição da qualidade geométrica da via é um dos principais parâmetros para a avaliação das condições das vias férreas e, portanto, um dos principais indicadores de qualidade. A perda dessa regularidade ocorre, normalmente, como consequência da degradação da via devido à passagem repetida dos comboios e da ocorrência da variação das condições climáticas, dependendo do comportamento da superestrutura e da subestrutura. De salientar que, um problema a nível da subestrutura é frequentemente associado e descoberto pelas irregularidades da via (Berggren, 2009; Fortunato, 2005).

De seguida apresenta-se uma breve descrição dos principais parâmetros geométricos de via, nomeadamente: i) nivelamento longitudinal; ii) nivelamento transversal, escala ou sobrelevação; iii) alinhamento; iv) empeno; v) bitola.

i) Nivelamento longitudinal

O nivelamento longitudinal (Figura 4.3) corresponde, no caso de medição com sistemas inerciais, ao desvio Z_p na direção z , perpendicular ao plano de rolamento em consecutivas posições do eixo de cada carril, em relação a uma linha de referência paralela ao plano de rolamento, calculado em sucessivas medições. O valor medido em cada carril é depois filtrado nas bandas de comprimentos de onda D1 (3m a 25m) e D2 (25m a 70m), sendo o D2 adequado para velocidades superiores a 160 km/h. Este parâmetro geométrico é responsável pela estabilidade vertical dos veículos e, como tal, o não cumprimento dos requisitos mínimos pode provocar o movimento de galope dos mesmos, isto é, a rotação em torno do eixo transversal da via (CEN Brussels, 2010; Fontul, 2017).

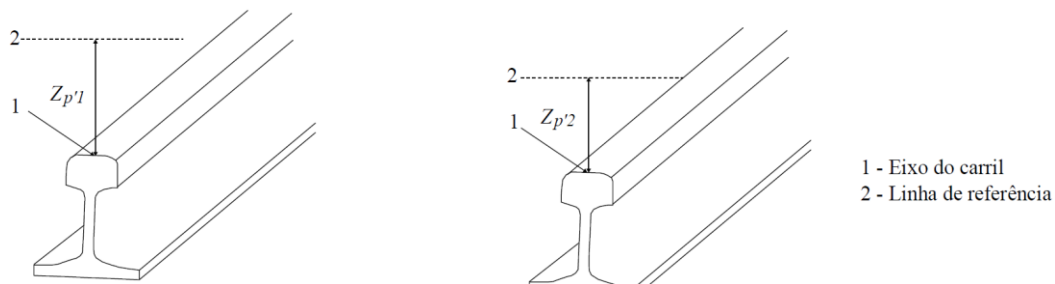


Figura 4.3 - Definição de nivelamento longitudinal (adaptado de CEN Brussels, 2010)

ii) Nivelamento transversal / Escala / Sobrelevação

O nivelamento transversal, escala ou sobrelevação pode ser definido como a diferença em altura da mesa de rolamento de cada carril, obtida pelo ângulo entre o plano de rolamento e o plano horizontal de referência, e corresponde à dimensão do cateto vertical de um triângulo retângulo, que tem como hipotenusa um valor de referência representativo da distância entre os eixos dos carris, como se mostra na Figura 4.4 (CEN Brussels, 2010).

As principais funções deste parâmetro geométrico são (Fontul, 2017): i) limitar os esforços transversais e choques à entrada e saída das curvas, que podem produzir descarrilamentos e capotagem; ii) conseguir um desgaste similar em ambos os carris; iii) permitir uma maior comodidade para os passageiros e evitar possíveis movimentos das mercadorias.

O material circulante deve respeitar a velocidade de projeto, pois para um dado raio de curva: i) se a velocidade for inferior à estipulada poderá ocorrer o esmagamento do carril da fila baixa e o desgaste do carril da fila alta, sendo possível ocorrer o tombamento do material circulante para o interior da curva; ii) se a velocidade for superior à estipulada poderá ocorrer o desgaste do carril na face exterior da curva, assim como o derrube do material circulante para o exterior da mesma. Para minimizar estes efeitos e simultaneamente permitir que a mesma curva seja percorrida por veículos a diferentes velocidades considera-se a utilização de escala. Tal se pode traduzir na existência de excesso ou insuficiência de escala, sendo que os mesmos se encontram balizados por valores limite, como forma de garantir a circulação das composições em condições de conforto e segurança.

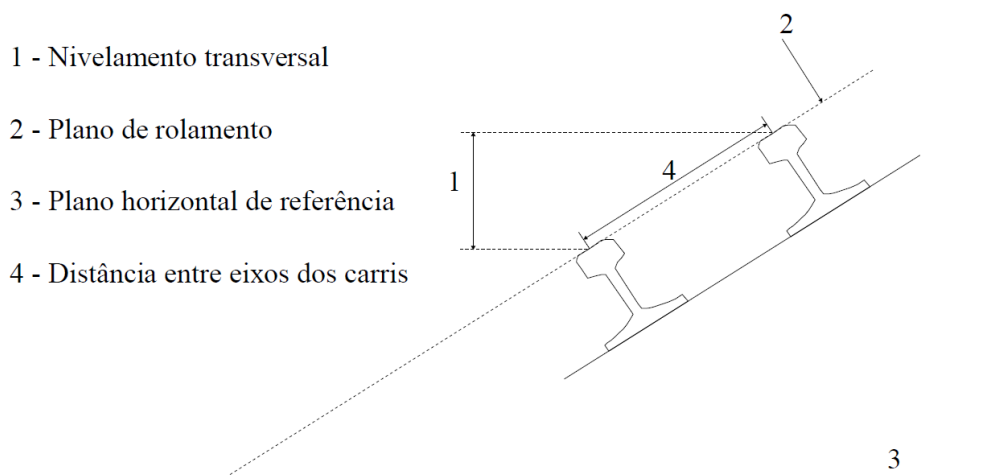


Figura 4.4 - Definição de nivelamento transversal (adaptado de CEN Brussels, 2010)

iii) Alinhamento longitudinal

O alinhamento é definido em cada carril como o desvio Y_p , na direção y do plano de rolamento, perpendicular ao eixo do carril (x), em consecutivas posições de P , em relação a uma linha de referência intermédia, como se indica na Figura 4.5. O valor medido em cada carril é depois filtrado nas bandas de comprimentos de onda D1 e D2, na semelhança do nivelamento longitudinal. Este parâmetro geométrico é essencialmente responsável pela estabilidade lateral dos veículos (CEN Brussels, 2010).

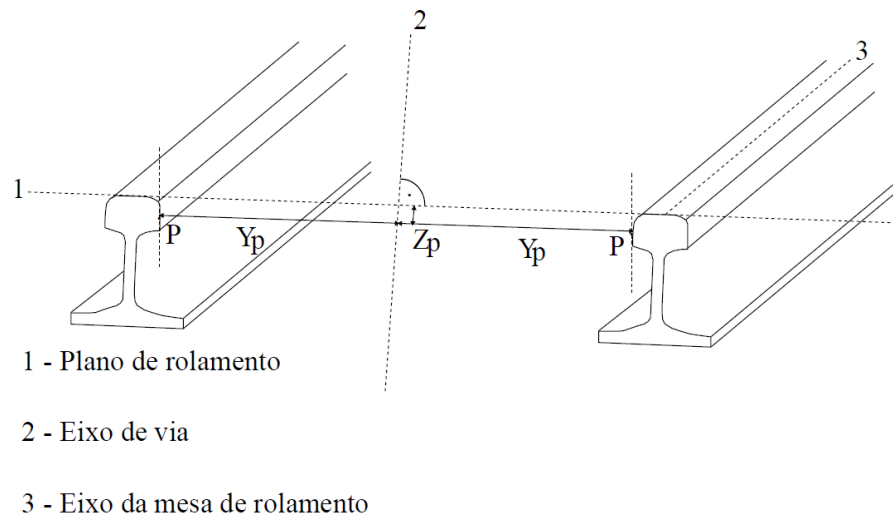


Figura 4.5 - Definição de alinhamento (adaptado de CEN Brussels, 2010)

iv) Empeno

O empeno (Figura 4.6) é definido como a diferença algébrica de dois nivelamentos transversais (H_1 e H_2) numa determinada base de medição (habitualmente de 3 metros) (CEN Brussels, 2010). A avaria de empeno é caracterizada por alterações bruscas de nivelamento transversal, as quais se traduzem em irregularidades no apoio dos rodados. Assim, este parâmetro é considerado extremamente importante no que diz respeito à segurança, podendo provocar o descarilamento de composições (Fontul, 2017).

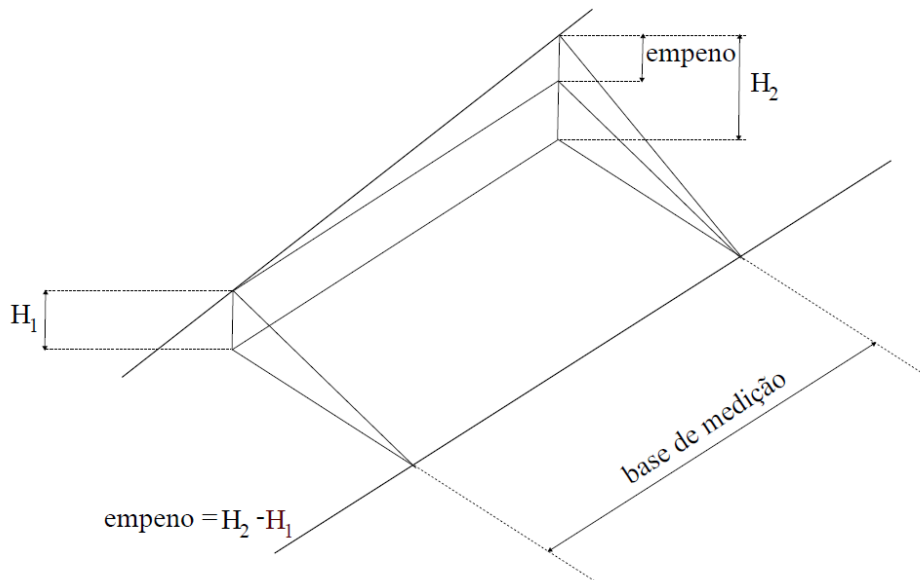


Figura 4.6 - Definição de empeno (adaptado de CEN Brussels, 2010)

v) Bitola

A bitola da via pode ser avaliada em termos pontuais ou médios. A bitola pontual da via (Figura 4.7) é a menor distância G entre as faces interiores das cabeças dos carris, medida num ponto P a uma distância Z_p do plano de rolamento, que varia entre 0mm e 15mm. Por outro lado, a bitola média representa a média, em 100 m, da diferença entre a bitola pontual e a bitola nominal, correspondendo esta última ao valor da bitola de referência da linha ferroviária em causa. Por exemplo, a bitola nominal ibérica é de 1668mm e a europeia de 1435mm (CEN Brussels, 2010; Fontul, 2017). O não cumprimento dos requisitos mínimos deste parâmetro pode levar a situações de descarrilamento. As patologias associadas à bitola (alargamento e estreitamento) estão normalmente relacionadas com o desgaste da cabeça do carril, função da circulação de comboios.

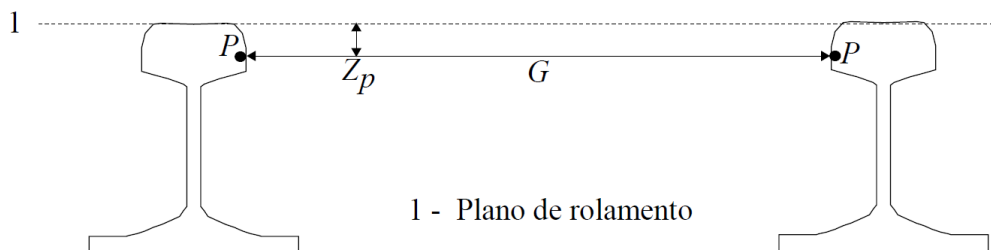


Figura 4.7 - Definição de bitola pontual (adaptado de CEN Brussels, 2010)

Embora os parâmetros geométricos da via acima mencionados sejam definidos e medidos separadamente, a sua influência é conjunta, o que implica que o incumprimento de um potencia a deterioração de outro.

De forma a avaliar o nível da qualidade geométrica de uma determinada via-férrea, os cinco parâmetros geométricos acima referidos devem ser comparados com três níveis de alarme (limites de alerta, de intervenção e de ação imediata). Mais concretamente, apresentam-se os requisitos (valores máximos admissíveis) em função da velocidade de circulação do comboio e dos três níveis de alarme mencionados. As gamas de valores aceitáveis podem ser encontradas em vários documentos, tais como, IT.VIA.018 (2009), ETI (2008), EN13848-5 (2010) e UIC518 (2005).

4.2.2. Veículo de Inspeção de Via - EM 120

Para garantir a circulação dos veículos em condições de conforto e segurança torna-se necessário conhecer a condição da infraestrutura ferroviária. Como referido anteriormente, a avaliação dessa condição é conseguida através de inspeções regulares da via com a medição dos seus parâmetros geométricos. Atualmente, fruto da evolução tecnológica, encontra-se disponível uma alargada gama de maquinaria, técnicas de execução e serviços que possibilitam a realização de inspeções de forma manual ou automática. Estes equipamentos para além de aumentarem a produtividade da monitorização propiciam também a adoção de medidas de reabilitação adequadas e, conseqüentemente, o aumento da vida útil dos elementos da via. Em geral, uns permitem determinar as características físicas e mecânicas da superestrutura e outros visam caracterizar os elementos constituintes da subestrutura. A avaliação da condição do carril com recurso a um veículo de inspeção de via (VIV) e mais recentemente a avaliação das camadas da infraestrutura com recurso ao radar de prospeção (GPR) são exemplos de possíveis inspeções em infraestruturas ferroviárias. Importa ainda referir que, para além destes dois métodos que são abordados neste subcapítulo, existem outros (Fortunato, 2005; Lopes, 2013; Marques, 2017).

Atualmente, as entidades gestoras de redes ferroviárias recorrem habitualmente a veículos de inspeção de via (VIV) para realizar a análise geométrica da via e respetivo registo. Em Portugal, a auscultação de via é efetuada pelo VIV – EM 120 (Figura 4.8), um veículo autopropulsionado que circula a uma velocidade semelhante à de um comboio corrente, podendo atingir a velocidade máxima de 120 km/h. Esta é uma das principais vantagens face aos outros métodos existentes, pois (Fortunato, 2005; Vale, 2010): i) proporciona a obtenção de registos em condições de solicitação dinâmica semelhantes às que ocorrem durante a passagem dos comboios correntes, isto é, reverte uma análise mais realista; ii) não necessita de interromper o tráfego, permitindo simultaneamente uma representação contínua do meio, nas secções transversal e longitudinal. Um outro aspeto é a utilização de tecnologias não destrutivas, isto é, as medições são realizadas sem contato e de uma forma contínua.



Figura 4.8 - Veículo de inspeção geométrica de via – EM 120

No interior do EM 120 existe equipamento informático (Figura 4.9) com a finalidade de simplificar as diversas tarefas. Os cinco parâmetros geométricos são registados sob forma numérica e gráfica em tempo real e são inseridos num ficheiro informático com medições espaçadas de 25 em 25 centímetros, onde as suas posições são relativas às posições sucessivas dos carris no espaço tridimensional, não existindo pontos fixos (Salcedas, 2016; Vale, 2010). Simultaneamente, o VIV-EM 120 tem a capacidade de determinar automaticamente (Silva, 2012): i) todos os troços da via onde um ou mais parâmetros geométricos excedam os valores das tolerâncias, registando a sua extensão, valor máximo e respetiva localização; ii) os índices de qualidade de via em tempo real, baseando-se nas variações da aceleração. Recorda-se que, a tolerância dos parâmetros geométricos depende da velocidade praticada na linha e da classificação UIC da mesma.

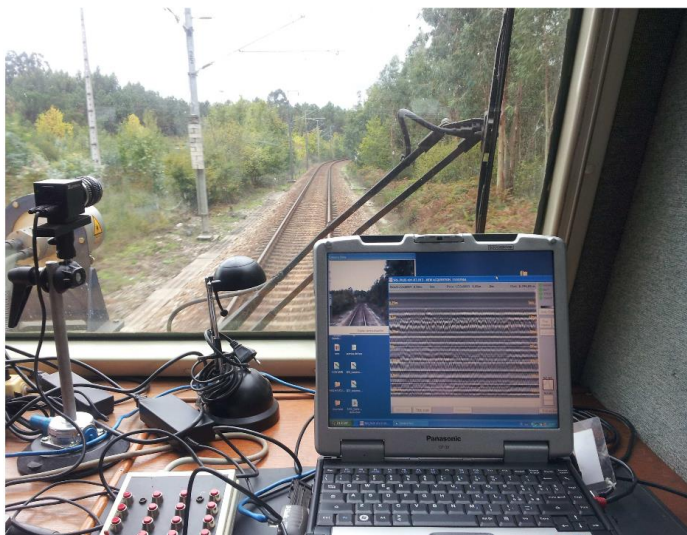


Figura 4.9 – Equipamento informático no interior do VIV - EM 120 (Fontul et al., 2016)

Em certos locais da via onde são detetados defeitos cujos parâmetros medidos não cumprem os limites de segurança, o VIV - EM 120 possibilita a identificação desse ponto crítico através de marcação física com cor (Figura 4.10). Tal ocorre normalmente onde existem defeitos de empeno, por se considerar que são os que trazem maior risco para a circulação ferroviária (Fortunato, 2005). Assim, os pontos críticos identificados deverão ser corrigidos de imediato, visto que o risco de descarrilamento é elevado.



Figura 4.10 - Identificação de um ponto crítico com marca de cor deixada pelo veículo de inspeção (Lee, 2009)

O sistema de medição do VIV – EM 120 é basicamente constituído por (REFER, EP, 2001): i) um recetor GPS (*Global Positioning System*) para localização geográfica dos registos; ii) um “*encoder*” que indica a distância percorrida pelo veículo; iii) uma “caixa inercial” (IMU - *Inertial Measuring Unit*) para medir acelerações (e, conseqüentemente, deslocamentos) e variações angulares; iv) e, um OGMS (*Optical Gage Measuring System*), isto é, um equipamento laser-ótico de medição;

O EM 120 possui os seguintes sistemas de inspeção (Baldeiras, 2008; Fontul, 2017; REFER, EP, 2001): i) sistema inercial de inspeção da geometria de via (Figura 4.11); ii) sistema laser-ótico (KLD) de inspeção do perfil transversal do carril (desgaste lateral e vertical, percentagem de cabeça do carril perdida e tipo de carril) (Figura 4.12); iii) sistema laser/ótico para inspeção do desgaste ondulatório do carril; iv) sistema laser para medição do perfil transversal da via (distância à plataforma, altura da plataforma, largura da entrevia, gabaritos, medição do perfil do balastro e medição de distâncias de obstáculos); v) sistema de inspeção da geometria da catenária (altura e desalinhamento do fio de contacto); vi) videografia (constituído por seis câmaras, três à frente e três atrás); vii) e, um GPR para medição da espessura de camadas.

Exemplos de saída de resultados dos parâmetros de geometria de via e dos perfis dos carris são apresentados na Figura 4.11 e na Figura 4.12, respetivamente.

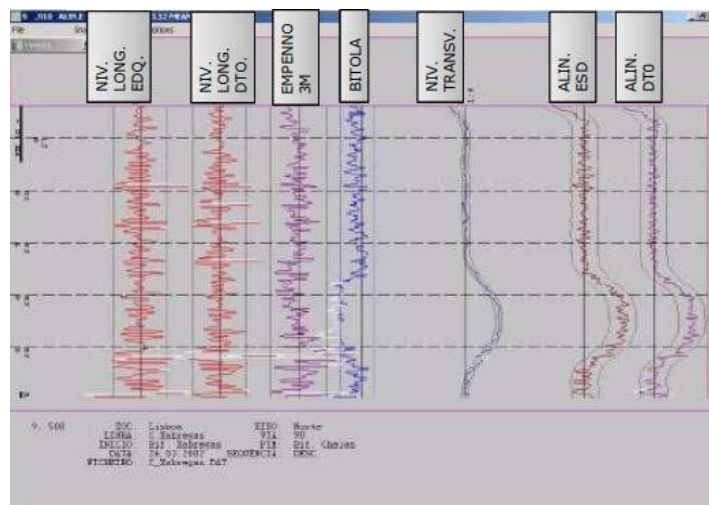


Figura 4.11 – Gráficos resultantes da medição dos parâmetros geométricos da via (Fontul, 2017)

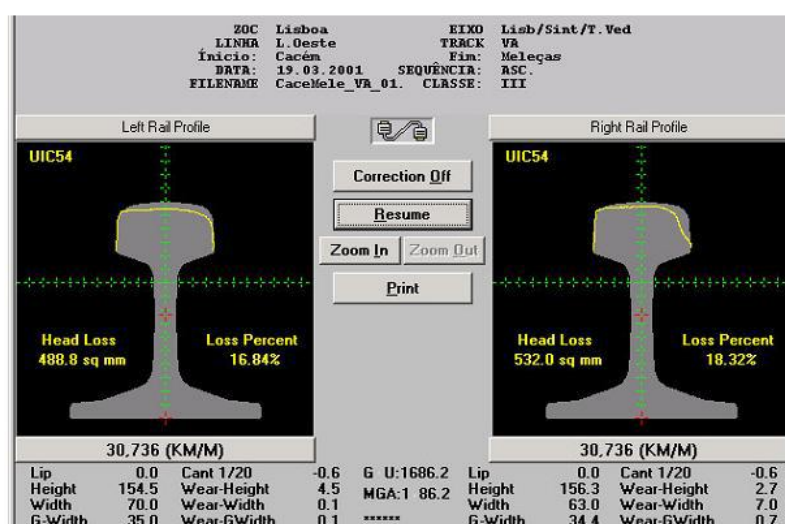


Figura 4.12 – Imagem da medição do perfil transversal do carril (Baldeiras, 2008)

Informação mais detalhada relativa aos constituintes do sistema de medição e do sistema de inspeção, ambos do VIV – EM 120, pode ser encontrada em Baldeiras, 2008; Cerdeiral, 2014; Fontul, 2017; REFER, EP, 2001; Salcedas, 2016; Vale, 2010.

Em suma, a tecnologia presente nestes veículos permite a inspeção contínua dos parâmetros de via e a comparação destes com os limites de tolerância definidos, assinalar os pontos críticos fisicamente na via, obter indicações relativas à qualidade dos trabalhos de conservação e de reabilitação e, ainda, tomar decisões relativas à programação destes trabalhos. Este tipo de aparelho engloba medições de vários equipamentos, tornando-se por isso um processo que minimiza trabalhos desnecessários e reduz despesas (Fortunato, 2005; Rodrigues et al., 2013).

O georadar, ou radar de penetração, ou, como normalmente é referido na literatura da especialidade, o GPR (*Ground Penetrating Radar*) é um tipo particular de radar (Figura 4.13).



Figura 4.13 – Antenas de GPR instaladas no VIV – EM 120

Trata-se de um método não destrutivo para a monitorização da subestrutura da ferrovia. Além disso, este método permite traçar um perfil contínuo do local e devido à sua rapidez de implementação e portabilidade, dispensa a interrupção temporária da via ao tráfego (Fontul et al., 2012; Fortunato, 2005; Lopes, 2013; Silva, 2012). Os componentes essenciais do sistema de georadar são: i) as antenas; ii) a unidade de transmissão e receção; iii) a unidade de controlo; iv) a unidade de armazenamento de informação.

Por outro lado, a principal limitação do método prende-se com a dificuldade na interpretação dos perfis. Embora a localização de singularidades no perfil não seja um problema, estas poderão ser causadas por diversos fatores, pelo que a experiência e bom senso do operador são determinantes para a credibilidade dos resultados (Fontul, 2004). No entanto, também as condicionantes geométricas da via, tais como a interferência criada nos perfis devida aos elementos metálicos (carris, travessas em betão armado, catenárias, entre outros) e a importância recente que a subestrutura da via adquiriu no âmbito da construção e reabilitação, são fatores que condicionaram no passado a aceitação da aplicação do GPR em infraestruturas ferroviárias (Berggren, 2009; Silva, 2012).

O modo de funcionamento (Figura 4.14) do GPR baseia-se na geração, emissão e receção de energia eletromagnética. Para isso dispõe normalmente de duas antenas, uma emissora e outra recetora. A antena emissora envia para a estrutura a energia, em forma de impulso de curta duração, gerada pelo equipamento. Esta energia propaga-se em profundidade e ao atravessar uma interface que delimita duas camadas de materiais de propriedades eletromagnéticas suficientemente diferentes, parte da energia é refletida e a restante prossegue a propagação por refração. A energia refletida é captada pela antena recetora, enquanto que a energia refratada é função do

contraste da impedância eletromagnética entre os dois materiais adjacentes. Note-se que quanto maior for a diferença entre as propriedades eletromagnéticas, maior é a reflexão para a superfície (Berggren, 2009; Fontul, 2004; Fortunato, 2005). Simplificadamente, a propagação da energia eletromagnética depende essencialmente de dois parâmetros: a constante dielétrica e a condutividade elétrica dos materiais. A constante dielétrica controla a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, a reflexão e a refração do sinal nos meios de baixa condutividade e sem suscetibilidade magnética. A condutividade controla a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas e também, no caso dos meios de elevada condutividade, a reflexão do sinal (Fortunato, 2005). Tal como se pode constatar na Figura 4.14, o tempo de percurso (t_1 , t_2) da energia refletida determina a localização, a partir da superfície, da interface entre as duas camadas adjacentes e a amplitude da onda (A_1 , A_2) recebida fornece a informação sobre o tipo de descontinuidade dielétrica (Fortunato, 2005; Wang et al., 2017). Uma definição das propriedades eletromagnéticas (permeabilidade magnética, constante dielétrica e condutividade elétrica) dos materiais pode ser explorada em Marques (2017).

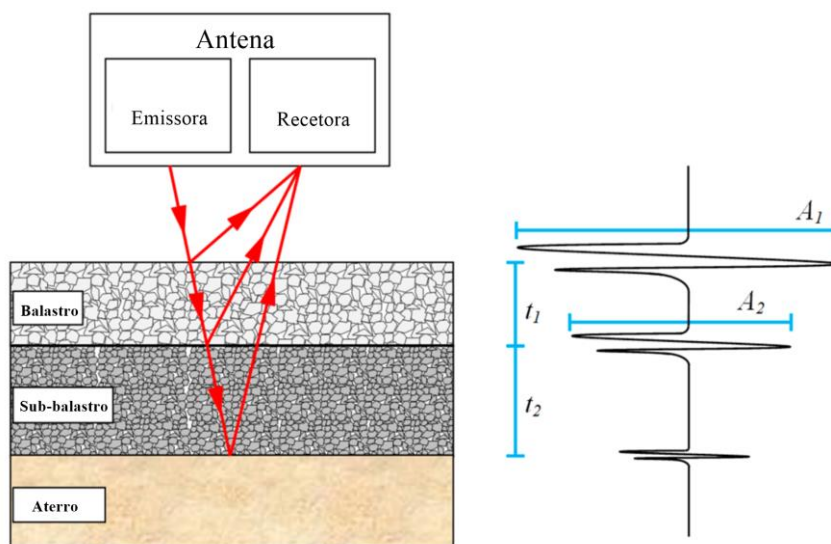


Figura 4.14 – Princípio de funcionamento do GPR (adaptado de Wang et al., 2017)

Atualmente este método é utilizado com sucesso em diversos campos de aplicação, nomeadamente: geologia, arqueologia e ciência forense, astronomia, reconhecimento e cartografia, topografia, exploração mineira e estudos ambientais. No campo da engenharia destaca-se a auscultação de pavimentos e de estruturas, a deteção e localização de elementos enterrados, localização de pontes nas vias férreas (Figura 4.15) e observação de obras de arte.

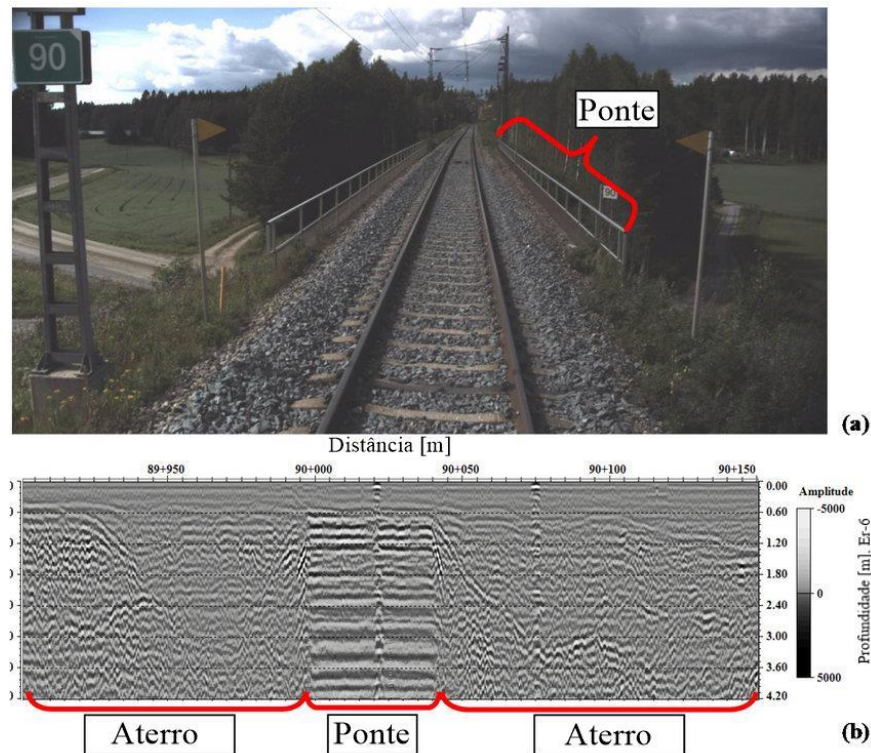


Figura 4.15 – Atuação do GPR: (a) imagem real do local; (b) dados resultantes da análise (Wang et al., 2017)

Particularmente nas ferrovias, é um sistema que fazendo uma medição em profundidade permite (Berggren, 2009; Marques, 2017; Silva, 2012): i) determinar a espessura e profundidade das camadas que compõem a estrutura da via; ii) identificar troços com anomalias, tais como balastro contaminado; iii) detetar secções da via com problemas de drenagem; iv) localizar intrusões (cabos, tubos, etc). Previamente à realização do ensaio, deve ser definido o número de alinhamentos de medição. A situação mais comum, no âmbito das infraestruturas ferroviárias, envolve três alinhamentos de medição paralelos, um entre os carris e um de cada lado dos carris. Porém, caso se opte por uma única linha de medição, esta deve ser realizada entre carris (Marques, 2017). O tipo de antenas e as frequências utilizadas no GPR determinam a sua capacidade no que respeita à velocidade de operação, à resolução e ao grau de penetração em profundidade no solo (Fernandes e Lourenço, 2007; Fontul, 2004). De entre outros fatores, os resultados das análises de inspeção dependem principalmente do tipo de antenas utilizadas, do número de varrimentos por metro e da calibração dos resultados (Fontul et al., 2012).

Assim, a utilização deste método possibilita a antecipação da necessidade de intervenções de conservação e de reabilitação, visto que permite acompanhar de forma sistemática a evolução no tempo das características dos elementos da via (Fortunato, 2005). Neste contexto, verifica-se que atualmente o GPR é um dos equipamentos cada vez mais utilizados e mais úteis no âmbito das infraestruturas de transporte.

4.3. Processamento de dados

Anteriormente, a classificação da qualidade da via era determinada pelo índice de qualidade global da via (TQI – *Track Quality Index*). Basicamente, consoante os valores de TQI alcançados para um dado caso havia uma correspondência de classificação do nível de qualidade de “mau”, “deficiente”, “aceitável” ou “bom”.

Atualmente, baseia-se nos níveis de qualidade geométrica (QN) da via-férrea que permitem avaliar não só a qualidade da via, como também a necessidade de manutenção desta, com o propósito de propor intervenções nos locais onde a qualidade não satisfaça determinados requisitos.

A norma europeia EN 13848-5 (2010) intitulada de “*Railway application - Track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels*” e a IT.VIA.018 - Tolerâncias dos Parâmetros Geométricos da Via (2009), apresentam valores para os Limites de Segurança (ou Ação imediata), Intervenção e Alerta relativamente aos parâmetros geométricos já mencionados no subcapítulo 4.2.1. Estes preconizam a existência de três indicadores descritivos da qualidade da via-férrea, nomeadamente: i) valores de pico de defeitos isolados; ii) desvio padrão em trechos de comprimento definido (100m para a bitola e 200m para os restantes); iii) média.

No caso da bitola, indicam-se os valores limites mínimos e máximos (respeitantes aos defeitos de estreitamento e alargamento de bitola), não só para o valor de pico da bitola nominal, como também para a diferença entre a bitola nominal e a bitola média em trechos de 100m. Verifica-se que os limites mínimos são, em valor absoluto, menores que os máximos, facto este que se deve à gravidade acrescida de um estreitamento em relação a um alargamento de bitola.

Para os restantes parâmetros geométricos, indicam-se os limites da diferença entre a média e o valor de pico em trechos de 200m. O cálculo da média e do desvio-padrão é realizado para o carril esquerdo e para o carril direito, tanto para o nivelamento longitudinal, como para o alinhamento.

Nesta norma, os limites de nivelamento e de alinhamento são definidos para duas gamas de comprimentos de onda denominados de D1 e D2 a que correspondem, respetivamente, comprimentos de onda entre 3 m e 25 m e, entre 25 m e 70 m.

Simplificadamente, e num determinado troço, valores de parâmetros geométricos que excedam valores limite implica a aplicação de medidas específicas. Neste sentido, existe uma correspondência entre a excedência de determinado limite (segurança, intervenção ou alerta) e uma tomada de medida: i) no caso do limite de segurança é imediatamente exigida a diminuição da velocidade máxima permitida ou mesmo o encerramento temporário da linha até que o defeito em causa seja retificado; ii) para o limite de intervenção requerem-se medidas corretivas de manutenção, a curto prazo, para que não seja atingido o limite de segurança; iii) no caso do limite de alerta origina a inclusão do troço em questão na programação de trabalhos de manutenção.

Há que considerar que os limites de segurança e intervenção são dados apenas para defeitos isolados, enquanto que os limites de alerta são dados para os demais defeitos isolados e irregulares.

dades de desvio-padrão. E ainda que, ao contrário dos limites de segurança, que têm em conta parâmetros relacionados com interação via/veículo, bem como o risco de situações inesperadas, os limites de intervenção e alerta estão essencialmente relacionados com a política de manutenção.

Atualmente, os QN da via são baseados no desvio padrão do nivelamento longitudinal e do alinhamento longitudinal, de 200 em 200 metros. A Tabela 4.1 apresenta uma correspondência entre os níveis de qualidade geométrica (QN1, QN2 e QN3) e o desvio padrão (do nivelamento longitudinal D1 e do alinhamento D1) para as várias classes de velocidade praticáveis. O QN em cada secção é assumido como o pior dos resultados, podendo ser o QN do alinhamento ou o QN do nivelamento longitudinal.

Tabela 4.1 - Correspondência entre o desvio padrão e os níveis de qualidade geométrica da via, para as várias classes de velocidade (REFER, EP, 2009)

Velocidade		Desvio padrão (mm)		Níveis de qualidade
Classe	(km/h)	Niv. Long	Alinhamento	
VI	$V \leq 40$	$\sigma \leq 3,3$	$\sigma \leq 2,1$	QN1
		$3,3 < \sigma < 4,29$	$2,1 < \sigma < 2,73$	QN2
		$\sigma \geq 4,29$	$\sigma \geq 2,73$	QN3
V	$40 < V \leq 80$	$\sigma \leq 3,0$	$\sigma \leq 1,8$	QN1
		$3,0 < \sigma < 3,9$	$1,8 < \sigma < 2,34$	QN2
		$\sigma \geq 3,9$	$\sigma \geq 2,34$	QN3
IV	$80 < V \leq 120$	$\sigma \leq 2,7$	$\sigma \leq 1,5$	QN1
		$2,7 < \sigma < 3,51$	$1,5 < \sigma < 1,95$	QN2
		$\sigma \geq 3,51$	$\sigma \geq 1,95$	QN3
III	$120 < V \leq 160$	$\sigma \leq 2,4$	$\sigma \leq 1,3$	QN1
		$2,4 < \sigma < 3,12$	$1,3 < \sigma < 1,69$	QN2
		$\sigma \geq 3,12$	$\sigma \geq 1,69$	QN3
II	$160 < V \leq 230$	$\sigma \leq 1,9$	$\sigma \leq 1,1$	QN1
		$1,9 < \sigma < 2,47$	$1,1 < \sigma < 1,43$	QN2
		$\sigma \geq 2,47$	$\sigma \geq 1,43$	QN3
I	$V > 230$	$\sigma \leq 1,5$	$\sigma \leq 1,0$	QN1
		$1,5 < \sigma < 1,95$	$1,0 < \sigma < 1,3$	QN2
		$\sigma \geq 1,95$	$\sigma \geq 1,3$	QN3

4.4. Medidas de reabilitação aplicáveis ao caso de estudo

A qualidade de uma linha de alta velocidade e a degradação da qualidade da maioria dos subsistemas dependem em grande parte da qualidade inicial desses subsistemas após a construção e dos cuidados tomados para manter a qualidade inicial no período de pré-operação e durante os primeiros meses de serviço. É imprescindível uma colaboração ativa entre os responsáveis pela construção e gestão da manutenção do sistema, por forma a se obter uma qualidade de construção elevada em determinada infraestrutura ferroviária (Goossens, 2010).

Reabilitação (de infraestruturas ferroviárias) e desenvolvimento sustentável são conceitos que devem forçosamente ser integrados e sê-lo de forma participada e aberta. Contudo, a realidade mostra que têm vindo a desenvolver-se em separado e apenas recentemente começam a ser considerados de forma integrada, talvez pelas dificuldades que se colocam a este nível. Estar atento às relações que se estabelecem entre economia, ambiente e sociologia, ou seja, prosseguir um desenvolvimento económico que promova o bem-estar das populações, sem pôr em risco os recursos naturais existentes.

As ações de manutenção e reabilitação de uma via-férrea englobam um vasto conjunto de operações que se podem dividir conforme necessitem de maquinaria pesada ou não. Estas ações podem ser mecânicas e/ou manuais, sendo que neste estudo se dará ênfase às primeiras, mais concretamente: i) ataque da via; ii) rebalastragem; iii) reforço com geossintéticos; iv) renovação integral da via (RIV); v) renovação integral da via (RIV) com reforço da subestrutura. Relativamente às soluções de reabilitação adotadas para o caso de estudo importa referir que, a descrição do processo de execução, em que situações estas devem ser aplicadas, o equipamento utilizado, as vantagens e desvantagens, os critérios associados e a performance dessas soluções face aos critérios encontram-se no seguinte capítulo.

4.5. Considerações finais

Considerando que a inspeção é a base de deteção dos defeitos que vão aparecendo ao longo da vida útil de uma via, no presente capítulo ressaltou-se a extrema importância da existência de um plano de monitorização e respetivas campanhas de inspeção à via-férrea. Neste sentido, abordaram-se os aspetos gerais e o modo de funcionamento do VIV – EM 120 e do radar de prospeção (GPR), ambos métodos de inspeção não intrusivos. Atualmente, face às exigências impostas, é importante que as campanhas de inspeção sejam rápidas, rigorosas, pouco onerosas e se possível, sem afetar o serviço perante os utentes.

As atividades de manutenção e reabilitação em vias-férreas obedecem a especificações técnicas fixadas em normas. O controlo de qualidade realizado através das inspeções visa avaliar a conformidade com essas normas. Nessas especificações constam as definições dos parâmetros geométricos de via e respetivas tolerâncias a serem respeitadas de acordo com três diferentes limites. Assim, é possível detetar anomalias, determinar as suas causas e realizar a ação de manutenção ou reabilitação mais apropriada.

Neste capítulo realizou-se também uma abordagem geral ao modo como é atualmente feita a organização e gestão das Infraestruturas ferroviárias em Portugal.

Em suma, aspetos como os custos envolvidos na infraestrutura, o seu comportamento esperado e as consequências de um comportamento anómalo, justificam inteiramente a existência de um programa de monitorização e inspeções como suporte ao processo de decisão relati-

vamente ao momento ideal, extensão e seleção dos trabalhos de manutenção ou mesmo reabilitação.

Uma vez concluído o plano de monitorização (incluindo a avaliação de danos), torna-se necessário decidir se deve ou não intervir e responder às seguintes questões: como e quando. “Como” intervir depende fortemente da condição atual da infraestrutura no nível de análise de decisão considerado. O “quando” depende essencialmente da disponibilidade de recursos e, geralmente, a informação disponível é escassa para realizar recomendações plausíveis.

5. Caso de Estudo

No presente capítulo pretende-se percorrer as etapas envolvidas no processo de reabilitação de infraestruturas ferroviárias (Figura 5.1). Assim, apresenta-se uma breve descrição dessas mesmas etapas. Como analisado no capítulo anterior, a existência de um plano de monitorização e respetivas campanhas de inspeção à via-férrea são determinantes para o decorrer do processo. Logo depois, a etapa de análise dos dados de inspeção de via que, quando comparados com as normas em vigor, permitem avaliar os danos existentes e, assim determinar a condição da infraestrutura que, para o presente caso de estudo, encontra-se no subcapítulo 5.1. Nestas condições, torna-se possível propor medidas de reabilitação adequadas (subcapítulo 5.2) e, por meio de uma análise multicritério (subcapítulos 5.3 e 5.4), determinar qual ou quais dessas medidas apresenta(m) melhor relação custo-benefício e, portanto, se adequa(m) melhor às atuais condições económicas e da infraestrutura.

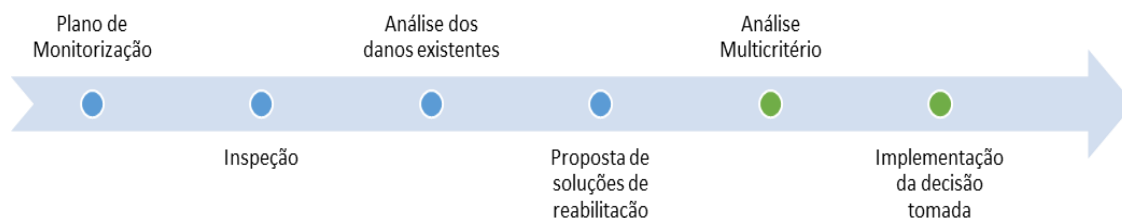


Figura 5.1 – Monitorização (a azul) e processo de tomada de decisão (a verde)

5.1. Descrição do caso de estudo

O trecho experimental abordado na presente dissertação pertence a uma linha ferroviária situada em Portugal Continental com bitola ibérica (1668 mm), que incorpora tráfego ferroviário misto (de passageiros e de mercadorias) e, por motivos de confidencialidade, será omitida a identificação da mesma. No entanto, tal não inviabiliza a caracterização da sua constituição e a descrição da sua condição atual que se encontram infracitados.

A linha apresenta uma extensão significativa e um traçado bastante sinuoso devido às irregularidades dos terrenos que atravessa, isto é, muitas curvas de raio reduzido e rampas de elevado declive. Ao longo do seu traçado é possível detetar alguma diversidade de características, em particular no que se refere ao tipo de elementos do armamento de via, como por exemplo, ao longo da linha ser possível encontrar troços constituídos por travessas de madeira, de betão monobloco ou bibloco e por dois tipos de carril.

Outro aspeto a salientar é a variabilidade de tipos de subestrutura que se traduz pela existência de singularidades como túneis, passagens de nível de veículos, pontes, estações/apadeiros, passagens inferiores e superiores e atravessamentos pedonais.

A esta diversidade de características encontra-se associado um estado de deterioração avançado, como por exemplo, contaminação da camada de balastro, existência de travessas fissuradas, assim como deficientes condições de drenagem. Para além da deterioração existem também outras condicionantes, tais como, a via possuir carris com juntas ao invés de juntas contínuas (BLS) e o facto da camada de balastro se encontrar diretamente apoiada na camada de solo, ou seja, o trecho não ser dotado de uma CSB.

Todos os aspetos enunciados e, em especial, o estado de deterioração proeminente a todos os níveis, conduzem a uma necessidade de reabilitação, o que se encaixa perfeitamente nos moldes do caso de estudo da presente dissertação.

5.2. Estudo de soluções de reabilitação

Por norma, as intervenções na infraestrutura ferroviária visam o reforço das condições de segurança e a melhoria dos níveis de fiabilidade e qualidade de serviço prestado aos utentes, assim como melhorar a integração da infraestrutura ferroviária no território envolvente, potenciando as externalidades positivas e mitigando as negativas (Infraestruturas de Portugal, 2018b).

Como abordado no capítulo 2, a degradação é diferente ao longo da via, existindo zonas em que é necessária uma intervenção mais profunda e outras em que apenas é necessária uma intervenção mais superficial. Neste sentido, e atendendo ao estado atual da via descrito anteriormente, propõem-se cinco medidas de reabilitação possíveis de adotar no trecho em estudo de entre as demais medidas de reabilitação existentes. Assim, e como enunciado no subcapítulo 4.4, serão abordadas: i) ataque da via – SR1; ii) rebalastragem – SR2; iii) reforço com geossintéticos – SR3; iv) renovação integral da via (RIV) – SR4; v) renovação integral da via (RIV) com reforço da subestrutura – SR5. Para cada uma das soluções apresenta-se, de seguida, a sua aplicabilidade, o processo de execução, o equipamento envolvido, as suas vantagens e desvantagens.

5.2.1. Ataque da via

O ataque da via, ou operação de ataque sobre o balastro, é provavelmente a ação de manutenção mais importante na superestrutura de via, por ser a operação responsável por devolver à via a qualidade geométrica perdida, por exemplo devido à ação do tráfego. Como tal, esta é a ação de manutenção que se realiza com maior frequência (Vale, 2010).

Esta operação consiste (Dantas, 2014; Infraestruturas de Portugal, 2018b; Vale, 2010): i) em acrescentar balastro novo à via; ii) na compactação e consolidação do balastro sob as travessas existentes na infraestrutura, através da elevação das mesmas, para que fiquem solidamente apoiadas, conferindo-se assim uma maior resistência e sustentação a toda a via; iii) e, no reposicionamento da grelha de via, retificando a geometria da via com recurso a um conjunto específico de veículos ferroviários. Segue-se a regularizadora da via, com o objetivo de que os vazios criados entre travessas fiquem preenchidos, garantindo o perfil transversal pretendido à camada através da transferência e repartição do balastro longitudinal e transversalmente. No entanto, nesta fase a via-férrea apenas permite velocidades relativamente reduzidas, não estando preparada para as velocidades normalmente permitidas naquele troço. Para tal ser possível, seria necessário um certo número de passagens de comboios a velocidade reduzida até o balastro reasentar. Para minimizar estes constrangimentos, recorre-se a um estabilizador lateral dinâmico (Dantas, 2014).

No que respeita à recuperação da qualidade geométrica da via (Figura 5.2) e à operação de ataque da via, esta é bastante influenciada pela qualidade geométrica da via no momento da realização da manutenção (Vale, 2010). De acordo com a UIC 719R (2008), o valor da recuperação é geralmente menor em vias com menor qualidade geométrica no momento da ação de manutenção.



Figura 5.2 – Aspeto do ataque da via para recuperação da qualidade geométrica

Outro aspeto referido pela mesma fonte é que a degradação do nivelamento longitudinal ao longo do tempo é geralmente mais rápida face aos outros parâmetros geométricos, sendo por isso, em grande parte, os defeitos de nivelamento longitudinal que condicionam e definem a periodicidade do ataque sobre o balastro.

Relativamente aos meios, estes podem ser manuais ou mecânicos (ligeiros ou pesados), sendo que neste capítulo será dada ênfase ao ataque mecânico pesado, não só devido à sua garantia de um melhor resultado final como também pela eficiência demonstrada em todos os tipos de terreno.

Numa perspetiva de otimização de recursos e tempos de indisponibilidade da via, os gestores de infraestruturas ferroviárias têm optado por compor comboios que agreguem as três vertentes do ataque de via (ataque, regularização e estabilização dinâmica) de modo a transformarem as três operações numa sequência em série (Dantas, 2014).

De seguida, apresenta-se a constituição, funcionamento e objetivo de cada equipamento utilizado nesta medida de reabilitação, sendo a ordem habitual de passagem de equipamentos a seguinte:

i) Atacadeira:

A função deste equipamento (Figura 5.3) é compactar o balastro através da compressão intensa exercida pela ação dos "pioches". Ao realizar movimentos combinados de vibração e aperto, promove a eliminação dos vazios existentes no balastro e o aumento da superfície de atrito entre partículas de balastro, assim como destas com as faces inferiores das travessas. Atualmente, fruto da introdução de sucessivas melhorias ao longo da evolução deste equipamento, é possível assegurar simultânea e automaticamente, para além do processo de ataque da via, correções de nivelamento longitudinal e transversal, de alinhamento longitudinal e de AMV (Infraestruturas de Portugal, 2018a).



Figura 5.3 - Atacadeira (Plasser American Website, 2018)

Após a atuação da atacadeira é imprescindível a passagem dum equipamento regularizador de via.

ii) Regularizadora de via:

As regularizadoras são constituídas por lâminas frontais e laterais que possibilitam ajustar a secção transversal da via à pretendida. Tal é possível através da remoção de balastro quando em excesso, ou da colocação do mesmo quando em falta como indicado na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Princípio de funcionamento da regularizadora (Plasser American Website, 2018)

A secção transversal pretendida (definida pela regulamentação) é normalmente alcançada através de sucessivas passagens do equipamento no sentido longitudinal da via-férrea. É vital produzir a seção transversal correta de balastro, tanto no curso da manutenção da via, quanto na colocação de novo balastro. Se este trabalho não for realizado regularmente, grandes quantidades de balastro podem estar em falta ou em excesso (sem utilidade) na rede da infraestrutura ferroviária. Além disso, e admitindo que existe uma propagação desnecessária da camada de balastro, poderá contribuir para a danificação do material circulante e acarretar custos adicionais derivados do desperdício. A operação de regularização deve ser seguida da operação de estabilização (Esveld, 2001).

iii) Estabilizador dinâmico de via:

O funcionamento do estabilizador dinâmico de via (Figura 5.5) prende-se, em certos casos, com a necessidade de simular a passagem de várias toneladas de material circulante devido à baixa densificação das camadas da superestrutura e baixa resistência lateral da via. Se porventura a via se encontrar nas condições descritas e não for alvo da intervenção deste equipamento, a via poderá sofrer assentamentos consideráveis em serviço, apresentando um baixo nível de segurança e ainda provocar deformações permanentes na via.

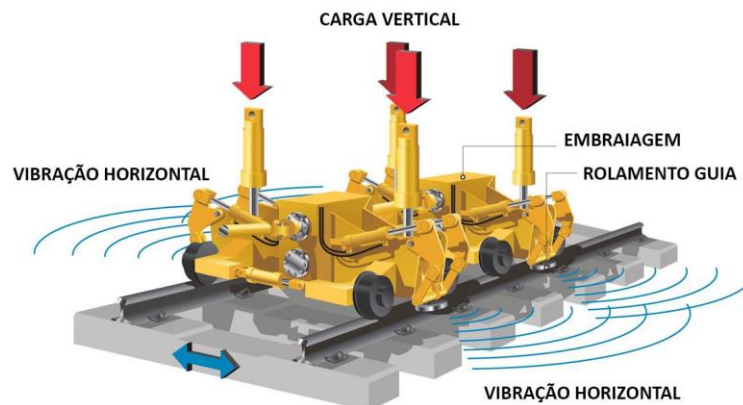


Figura 5.5 – Princípio de funcionamento do estabilizador dinâmico de via (adaptado de Plasser American Website, 2018)

O objetivo desta técnica é a excitação lateral da via enquanto esta se encontra a ser solicitada por um carregamento vertical ao nível dos carris, por forma a alcançar uma melhor ancoragem entre todos os elementos da superestrutura da via-férrea. Algumas das considerações a ter em conta desta operação são (Esveld, 2001): i) a frequência de excitação pode ser ajustada; ii) a vibração transmitida ao balastro encontra-se na faixa de frequência natural do balastro, permitindo que as partículas assentem eficazmente dentro das cavidades; iii) o resultado é um rearranjo livre de forças entre partículas de balastro; iv) o número de cavidades é reduzido, pois em vez de pontos de contato individuais, as partículas de balastro passam a possuir um número maior de superfícies e arestas de contato; v) e, o mesmo se verifica entre travessas e partículas de balastro, visto a soma das superfícies de contato aumentar consideravelmente.

De acordo com o aclarado acima, pode aferir-se que com a homogeneização da camada de balastro consegue-se obter um aumento da durabilidade da manutenção da via. O aumento das superfícies de atrito entre as travessas e o balastro concebe à via-férrea uma maior resistência ao deslocamento lateral, com ou sem carregamento aplicado, sendo que o mesmo se sucede com a resistência da via no sentido longitudinal. Por último, o aumento das superfícies de contato permite uma maior capacidade à transmissão de esforços (Esveld, 2001).

Após a estabilização dinâmica, a condição da infraestrutura oferece maior segurança operacional e permite, em particular na via recém-construída ou após a manutenção completa da via, a circulação à velocidade máxima para que esta foi projetada. Neste sentido, esta operação permite evitar restrições de velocidade e reduzir, em geral, os obstáculos operacionais (Figura 5.6) (Esveld, 2001).

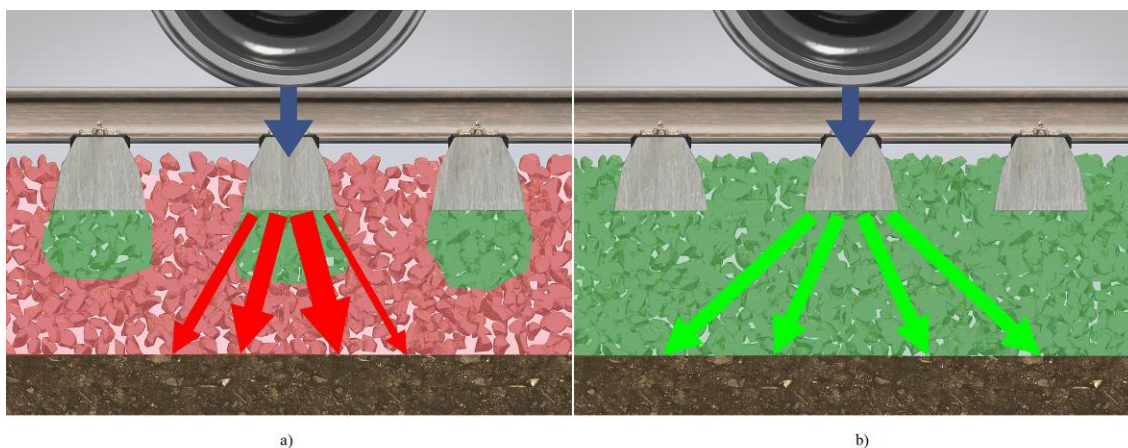


Figura 5.6 – (a) Efeito após regularização da camada de balastro; (b) Situação (a) seguida de estabilização dinâmica da via (Plasser American Website, 2018)

Como é possível observar na Figura 5.6 a), após a regularização da camada de balastro, apenas o balastro sob as travessas foi compactado. Nesta situação a carga vertical não é transmitida uniformemente a toda a camada. Na Figura 5.6 b), verifica-se que a vibração rearranjou as partículas de balastro, originando uma camada homogênea. Nesta situação, a carga vertical é distribuída uniformemente e corresponde à situação desejável.

5.2.2. Rebalastragem

O balastro representa um dos elementos da via-férrea cujos parâmetros mais importantes, tanto do ponto de vista comportamental como de monitorização, são muito difíceis de monitorizar, especialmente de uma forma contínua e em larga escala. Esses parâmetros são, entre outros, o nível de contaminação do balastro, conteúdo petrográfico, percentagem de matéria orgânica, ervas daninhas, poluição superficial, geometria das partículas, distribuição das partículas, dureza e rigidez, abrasão, idade e energia acumulada (relativa aos ciclos de passagem de comboios). Assim, pode-se concluir que devido a estas condicionantes, o comportamento desta camada é menos conhecido, traduzindo-se numa difícil monitorização e consequente dificuldade na gestão bem-sucedida desta camada (Esveld, 2001).

Como abordado no subcapítulo 2.4.1, a camada de balastro ao se encontrar contaminada perde, essencialmente, capacidade no que respeita às funções de distribuição de carga e de drenagem. Atendendo a estas e outras funções desta camada, é importante estabelecer uma regra geral: i) deve-se proceder à limpeza do balastro caso existam mais de 30% de finos (partículas de tamanho inferior a 22 mm) no balastro; ii) e, é absolutamente necessário proceder à limpeza do balastro caso essa percentagem de finos exceda os 40% (Esveld, 2001). Atendendo a esta regra e ao seu valor de contaminação, o processo de rebalastragem pode consistir numa substituição parcial ou total do balastro.

O processo de rebalastagem, também denominado de desguarnecimento e depuração do balastro, tem como objetivo a limpeza do balastro através da eliminação dos finos e acréscimo, sempre que necessário, de balastro novo. Este processo (Figura 5.7 e Figura 5.8) inicia-se com o desguarnecimento da camada de balastro, isto é, a escavação da camada de balastro até uma dada profundidade (usualmente de 25 cm) abaixo das travessas, através de dentes de escavação aos quais está ligado um tapete rolante que transporta o material para cima.

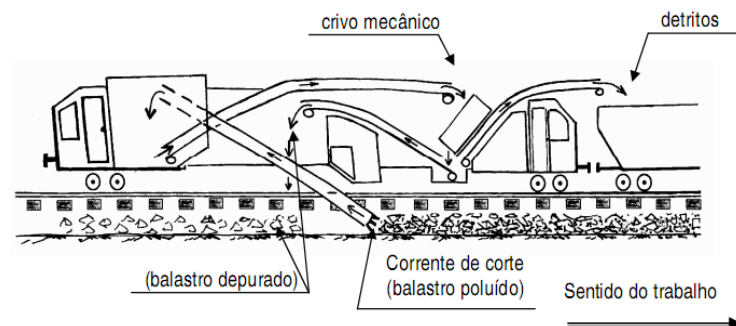


Figura 5.7 - Desguarnecedora-depuradora de balastro (Fernave, 2003)



Figura 5.8 – Desguarnecedora-depuradora de balastro em funcionamento (Plasser American Website, 2018)

Um dos aspetos a ter em conta nesta operação é a profundidade de desguarnecimento (espessura de corte com a lâmina), que está relacionada com a espessura dos materiais que vão ser aplicados, os que existem na via e a nova rasante da via intervencionada. Segue-se o processo de depuração mecânica, onde o balastro é limpo e peneirado num sistema de peneiras vibratórias, isto é, filtram-se as partículas finas e outros detritos do balastro escavado, aproveitando-se apenas o material com granulometria superior à abertura do peneiro escolhido, devolvendo-o à via e adicionando balastro novo à via (Dantas, 2014; Esveld, 2001; Infraestruturas de Portugal, 2018b; Silva, 2012).

Em média, por cada metro de via existe cerca de 1,5 tonelada de balastro contaminado. Atualmente, a prática de despejar esse mesmo balastro contaminado para as margens da via não é mais aplicável, sendo por isso utilizados sistemas de carregamento de resíduos na frente da máquina, que acompanham a velocidade de trabalhos que vão sendo executados.

Desta forma, os carros são carregados com resíduos um após o outro, começando pela frente. Devido a fatores ambientais, o material residual deve ser transportado para lixeiras especiais para descontaminação, deposição ou reciclagem. Assim que um número de carros é carregado, estes são separados do resto e transportados para o depósito de lixo onde efetuam o descarregamento (Esveld, 2001).

5.2.3. Reforço com geossintéticos

Os geossintéticos são grandes aliados na resolução de inúmeros problemas da Engenharia Civil, com particular importância nos de origem geotécnica. Estes materiais pertencem à família de produtos sintéticos (usualmente plásticos, isto é, materiais orgânicos poliméricos sintéticos) e existem diversas categorias consoante os campos de utilização e necessidades, sendo exemplo disso: geotêxteis, geogrelhas, geocélulas, geomantas, geocompósitos, geoespaçadores e geomembranas.

Relativamente às funções destes materiais, pode dizer-se que, basicamente, as geogrelhas fornecem uma função de reforço e os geotêxteis podem fornecer funções de separação de materiais com diferentes granulometrias, filtragem, reforço e drenagem. De salientar que, essas mesmas funções podem ser conseguidas na conceção de novas infraestruturas ferroviárias ou na reabilitação das mesmas. As características necessárias para a utilização de geotêxteis e produtos relacionados com o mesmo na construção de infraestruturas ferroviárias encontram-se na norma europeia EN 13250 (2016) ou na tradução em português da mesma NP EN 13250 (2017) intitulada de “Geotêxteis e produtos relacionados – Características requeridas para a utilização na construção de vias férreas”.

Primeiramente em obras rodoviárias, mas também em obras ferroviárias, a aplicação de geossintéticos tem-se revelado uma solução técnica e economicamente atrativa, especialmente na reabilitação das mesmas. Desde a década de 70 que inúmeros estudos e casos práticos reais comprovam que se os geossintéticos forem adequadamente instalados, estes podem incrementar o desempenho global da infraestrutura ferroviária (em termos mecânicos e hidráulicos), aumentando a sua vida útil e, conseqüentemente, permitem aumentar significativamente os períodos entre intervenções de manutenção e reduzir os custos associados. Como referido, esta técnica já foi realizada com sucesso em bastantes infraestruturas ferroviárias, representando a Figura 5.9 e a Figura 5.10 um exemplo da sua aplicação.



Figura 5.9 – Infraestrutura ferroviária após reabilitação com introdução de geossintéticos (Esveld, 2001)



Figura 5.10 - Aplicação de geotêxtil (“Geosin Geosynthetics,” n.d.)

Segue-se uma breve descrição de possíveis aplicações de geossintéticos em infraestruturas ferroviárias com carácter de reforço e de impermeabilização, especialmente as relacionadas com problemas a nível da superestrutura e subestrutura. No entanto, deve ser tido em conta que existe outro tipo de aplicações possíveis, tais como: i) a utilização de geocélulas no controlo da erosão de um talude; ii) o reforço de um muro de suporte de terras com recurso a geogrelhas uniaxiais; iii) e, a drenagem, separação e filtragem na interface entre a CSB e o solo de fundação por meio de um geotêxtil.

Reforço da capacidade resistente da Plataforma

A situação mais comum passa pela inclusão de determinados geossintéticos sob as camadas de balastro e/ou sub-balastro (Figura 5.11). Um desses geossintéticos pode ser a geogrelha, caso se verifique uma necessidade de reforço. Esta necessidade pode estar associada a um inadequado dimensionamento da espessura das camadas de balastro e sub-balastro. Tal pode ser constatado pela ocorrência de elevados assentamentos verticais, mas sem a penetração do balastro na base

da plataforma, a menos que os níveis de degradação sejam tão avançados que os níveis de tensão sejam demasiado elevados face à capacidade de carga da base da plataforma.

É de referir que, a eficácia das geogrelhas no reforço da camada de balastro é afetada por diversos fatores, como a geometria das aberturas, o número, níveis, afastamento e profundidade de colocação dos reforços.

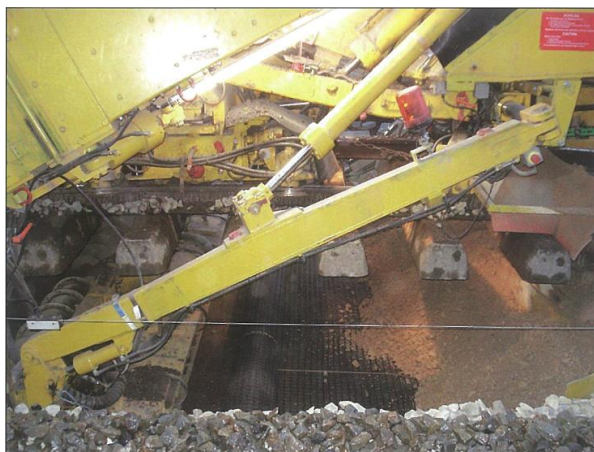


Figura 5.11 – Reforço da superestrutura com geogrelha (Plasser American Website, 2018)

Reforço da capacidade resistente da Fundação

Um caso quase semelhante ao anterior é a necessidade de reforço da fundação devido à falta de capacidade de carga da mesma, possivelmente recorrendo a geogrelhas. Tal é evidenciado pela verificação desses mesmos assentamentos verticais, mas com a penetração das camadas granulares na base da plataforma.

Impermeabilização da Plataforma

A necessidade de impermeabilização da plataforma ferroviária surge quando se está em presença de solos sensíveis à ação da água, os quais, na presença desta tendem a tornar-se plásticos, com diminuição das suas características resistentes, facilitando assim a penetração do balastro. Uma solução admissível é a aplicação de geomembranas impregnadas com betume. Esta solução é viável, no pressuposto de que a água que chega à plataforma é drenada lateralmente, ou seja, em condições eficientes de drenagem. Em outras situações, em que o nível freático está próximo da superfície, deve ser dada especial atenção às condições de drenagem profunda, caso contrário, a solução será ainda pior que a situação inicial, visto que permite a acumulação de água por baixo da impermeabilização, não possibilitando o escoamento da mesma no sentido ascendente, provocando o amolecimento da fundação.

Impermeabilização da Fundação

Para a impermeabilização da fundação, a solução que mais correntemente se utiliza é a aplicação de geomembranas. Para além da impermeabilização do solo de fundação também permite

travar o fenómeno de contaminação do balastro proveniente das camadas inferiores. A experiência com geomembranas tem-se mostrado vantajosa técnica e economicamente.

Com base nas aplicações descritas acima, pode-se constatar que, na sua generalidade, as principais vantagens resultantes da aplicação de geossintéticos são: i) melhorar a capacidade de suporte; ii) reduzir a espessura de determinadas camadas (balastro e/ou sub-balastro); iii) controlo do fenómeno de contaminação do balastro; iv) reduzir os assentamentos diferenciais na camada de balastro derivados do espalhamento lateral dessa mesma camada; v) reduzir a taxa de deformações permanentes geradas devido ao carregamento cíclico.

Por outro lado, há que considerar que a aplicação de geotêxteis em infraestruturas ferroviárias é uma tarefa que requer rigor, apresentando por isso algumas especificidades quando comparado com outros campos de aplicação. Estas especificidades resultam do carácter cíclico que as solicitações apresentam, da intensidade dessas solicitações, da granulometria e forma do material (principalmente o balastro) que contacta diretamente com os geossintéticos, do carácter abrasivo a que o geossintético fica sujeito e da maquinaria disponível para aplicação destes materiais.

Os fatores enunciados acima têm uma grande influência nas capacidades resistentes do geotêxtil, nomeadamente na sua resistência à tração, rasgamento e punçoamento. Um outro aspeto muito importante a considerar é a alteração das características hidráulicas do geossintético, fruto de perfurações, cortes e da abrasão que alteram a dimensão aparente dos seus poros, a permissividade e a transmissividade.

Em suma, salienta-se que, de entre as diversas soluções possíveis com recurso a geossintéticos apresentadas acima, para a presente dissertação esta medida de reabilitação foi assumida como a intervenção a nível da plataforma, isto é, colocação de geossintéticos na interface balastro / sub-balastro, com a função de reforço e/ou estabilização. Quando a aplicação é ao nível da interface balastro / sub-balastro, o equipamento começa por levantar os carris e travessas e, de seguida, afasta o balastro por forma a aplicar o geossintético. Após a sua aplicação, o balastro é recolocado e a estrutura assente sobre o mesmo.

5.2.4. Renovação integral da via (RIV)

Abreviadamente designada por RIV, esta consiste na renovação dos constituintes da superestrutura, isto é, carris, travessas, balastro e restante material de ligação e de fixação (Infraestruturas de Portugal, 2018a). Atendendo à constituição das linhas ferroviárias mais antigas, habitualmente a RIV contempla: i) a substituição de travessas em madeira por travessas em betão (bloco); ii) a substituição dos carris existentes (por norma, com juntas) por carris novos, realizando-se a transformação em BLS; iii) e, o processo de rebalastragem.

Em condições normais, recorre-se a esta solução de reabilitação quando após a inspeção da via-férrea, se conclui que esta apresenta na sua generalidade um avançado estado de degradação.

dação ou pela necessidade de se otimizar o desempenho das vias-férreas sem que esta se encontre propriamente no fim do seu ciclo de vida. No entanto, em casos bastante extremos pode significar a necessidade de se intervir abaixo da superestrutura, sendo esse processo descrito no ponto que se segue (subcapítulo 5.2.5).

A substituição de grande parte da superestrutura pode ser feita individualmente, caso se apliquem técnicas manuais. Atualmente, existem carros de renovação de via mecanizados (Figura 5.12) capazes de renovar uma parte ou mesmo todos os elementos constituintes da via-férrea (Esveld, 2001).



Figura 5.12 – Renovação integral da via [adaptado de Plasser American Website (2018)]

As operações envolvidas na RIV requerem a preparação cuidadosa de um planejamento que englobe a diversidade de fatores envolvidos e o desafio em causa. Por exemplo, ao ser realizada por trechos e de modo a não perturbar a circulação normal, as operações têm de ser realizadas durante a janela horária de interdição total da via, colocando vários desafios logísticos.

Neste sentido, é essencial equacionar diversos fatores, tais como: i) dados relativos às fraturas ferroviárias em relação à tonelagem de tráfego suportada; ii) nível de desgaste dos carris; iii) qualidade do sistema de fixações; iv) qualidade das travessas, especialmente no que diz respeito a fissuras e deterioração das superfícies de apoio; v) geometria atual e tendências baseadas nos dados de inspeção de via; vi) desenvolvimento de custos de manutenção; vii) e, a possibilidade de reaproveitamento dos materiais a remover. Ainda assim, deve ser realizada uma comparação a outras medidas de reabilitação mais simplistas, tais como vantagem a nível económico, a eventual inoperacionalidade da via para fins de renovação e o cumprimento de prazos.

5.2.5. Renovação integral da via (RIV) com reforço da subestrutura

Esta medida de reabilitação apresenta um processo semelhante à anterior medida (RIV), com a particularidade de intervir adicionalmente ao nível da subestrutura.

A melhoria das secções da via com problemas no subsolo ou fundação é absolutamente necessária por diversas razões. A subestrutura com uma resistência insuficiente é principalmente um problema técnico sério, porque põe em risco a estabilidade da via permanente (e a sua geometria) ao mais alto nível.

A falta de manutenção da via e o ciclo de vida de todo o material da via permanente ao ser reduzido consideravelmente originam um elevado resultado em termos de despesa financeira. Um inadequado ou inoperacional sistema de drenagem de águas, tanto na secção transversal como no sentido longitudinal, é outro fator condicionante que contribui para a perda das características funcionais da camada de subsolo. Um subsolo originalmente de baixa qualidade pode também causar enormes custos adicionais, tanto no que diz respeito aos custos de manutenção de via, quanto aos custos associados ao impedimento operacional da via, bem como o encurtamento do ciclo de vida dos materiais constituintes da via (Esveld, 2001).

No entanto, desde o início dos anos setenta que uma das técnicas possíveis de reabilitação (Figura 5.13 e Figura 5.14) da subestrutura é a inserção de uma CSB através de um equipamento dedicado para o efeito (Figura 5.15).



Figura 5.13 – Processo de reabilitação da via (Esveld, 2001)



Figura 5.14 – Colocação de uma CSB (Plasser American Website, 2018)

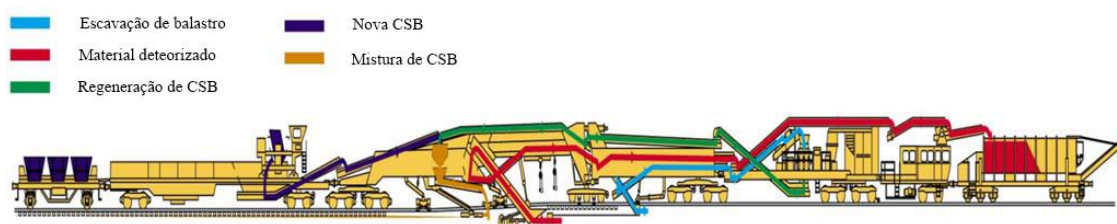


Figura 5.15 – Máquina de reabilitação da subestrutura para via simples com duas correntes de escavação e reciclagem integrada de materiais - AHM 800 R (adaptado de Esveld, 2001)

Trata-se de um método eficaz e comprovado para aumentar a resistência do subsolo. Como resultado dessa medida, há uma enorme redução dos custos de manutenção de via. Esta camada consiste numa mistura especial de areia e cascalho que deve cumprir a regra de filtragem de Terzaghi (que determina o tamanho dos vazios) e os critérios de geada de Casagrande (Esveld, 2001). O material escavado durante o processo de reabilitação contém matéria-prima valiosa que, sempre que possível, deve ser utilizada neste processo. Assim, a reutilização deste material reciclado permite reduzir os custos da intervenção de reabilitação, pois permite reduzir as despesas de transporte e de aquisição de novos materiais (Esveld, 2001).

Assim, a RIV com reforço da subestrutura pode ser entendida como a aplicação de uma CSB a nível da subestrutura e consequente desenvolvimento da técnica RIV, tal como descrito no ponto anterior (subcapítulo 5.2.4).

5.3. Análise multicritério aplicada ao caso de estudo

No subcapítulo 5.1 concluiu-se existir uma necessidade extrema em reabilitar o trecho em estudo e, para o mesmo foram estudadas cinco alternativas (leia-se soluções de reabilitação) possíveis de implementar, surgindo assim a necessidade de se recorrer a uma metodologia de apoio à decisão.

De entre as metodologias de apoio à decisão existentes, irá ser aplicada a análise multicritério ao presente caso de estudo, dado que se dispõe de um conjunto de alternativas, especialistas com diferentes opiniões e critérios independentes entre si a otimizar em simultâneo. Outros aspetos a ter em conta são as maiores exigências atuais, quer ao nível do desempenho estrutural, quer ao nível da otimização da utilização dos recursos financeiros e a rapidez de execução dos empreendimentos.

Perante as distintas metodologias de análise multicritério elegeu-se a metodologia MACBETH, que possibilita a escolha de uma alternativa entre várias e também a ordenação de alternativas. A sua principal particularidade é permitir incorporar tanto critérios com níveis de desempenho quantitativos, como qualitativos, o que é imprescindível para o caso de estudo. Este método baseia-se na comparação da atratividade de um critério em relação a outro, atribuindo-se diferentes julgamentos de preferência de entre os seguintes: extrema, muito forte, forte, moderada, fraca, muito fraca e indiferente.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, apresentam-se as atividades associadas à aplicação do método MACBETH ao presente caso de estudo.

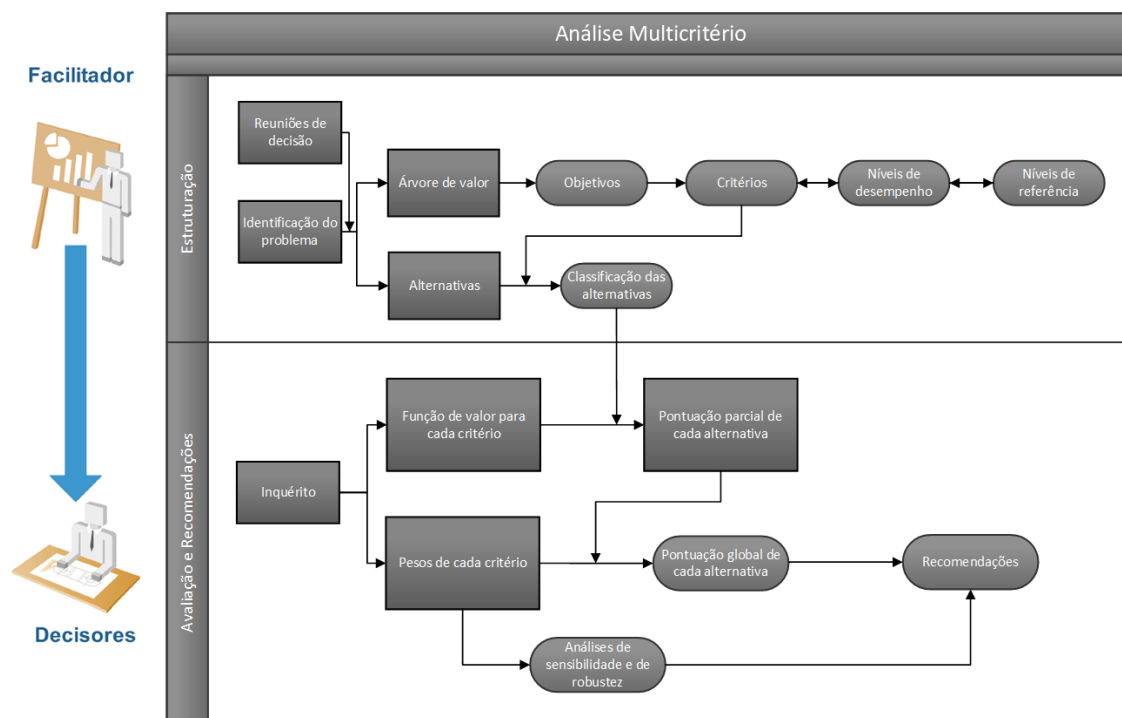


Figura 5.16 – Atividades desenvolvidas para a construção do modelo MACBETH

O processo preconizado para aplicação do método MACBETH ao caso de estudo concretiza-se nas seguintes etapas:

1. **Identificação do problema.** Existe uma necessidade extrema em reabilitar o trecho em estudo;
2. **Identificar as alternativas.** As alternativas são identificadas com base no processo de decisão em questão e constituem opções de escolha ou ordenação. Neste caso, dizem respeito às cinco soluções de reabilitação;
3. **Definir a árvore de valor.** A árvore de valor é um diagrama que explicita os aspetos importantes a analisar no processo de tomada de decisão e que podem vir a formar critérios;
4. **Identificar os objetivos e critérios** de entre as preocupações presentes e identificadas na árvore de valor. Estes critérios têm de ser independentes entre si e não redundantes;
5. **Determinar os níveis de desempenho associados a cada um dos critérios.** Níveis de desempenho são patamares que as alternativas podem assumir e que posteriormente são utilizados para estabelecer as funções de valor. Nesta metodologia os níveis de desempenho podem ser qualitativos ou quantitativos;
6. **Definir níveis de referência.** A ponderação dos critérios requer que sejam definidas em cada critério duas referências de ponderação (uma “superior” e uma “inferior”, usualmente referentes a “bom” e “neutro”, respetivamente);
7. **Classificar as alternativas relativamente aos critérios**, isto é, atribuir os valores das alternativas em cada um dos critérios;
8. **Estabelecer as funções de valor para cada critério** considerando os diferentes níveis de desempenho. Uma função de valor possibilita a conversão dos valores das alternativas num dado critério num valor adimensional. Estas funções de valor podem ser calculadas com recurso ao *software* M-MACBETH;
9. **Definir os pesos para cada critério.** Estes pesos são calculados por aplicação do algoritmo MACBETH;
10. **Calcular as pontuações parciais das alternativas.** A pontuação de uma alternativa para um dado critério resulta da função de valor e do valor da alternativa nesse mesmo critério;
11. **Calcular as pontuações globais das alternativas.** A pontuação global de uma alternativa resulta do somatório da multiplicação do peso dos critérios pelas pontuações parciais correspondentes;
12. **Escolher ou ordenar as alternativas em função da pontuação global.** Esta ordenação é feita de forma a sustentar a decisão. Caso seja um problema de escolha das n alternativas mais pontuadas selecionam-se as n alternativas com uma pontuação global maior. Caso seja um problema de ordenação, estas alternativas podem ser ordenadas por ordem decrescente ou crescente da pontuação global;

13. Análises de sensibilidade e de robustez. A análise de sensibilidade no peso de um critério permite analisar em que medida as recomendações do modelo se alteram ao variar o peso de um critério, mantendo as relações de proporcionalidade entre os restantes pesos. Por outro lado, a análise de robustez permite examinar que conclusões robustas se podem extrair do modelo para níveis variados de escassez, imprecisão ou incerteza na informação.

Como referido anteriormente, o presente caso de estudo diz respeito a uma situação de reabilitação de uma infraestrutura ferroviária. Neste sentido, para uma correta análise multicritério foi necessário analisar quem seriam os intervenientes antes, durante e após o processo de reabilitação. Reconheceu-se a necessidade de incorporar as opiniões dos seguintes especialistas: o responsável pela gestão da infraestrutura (Gestor da infraestrutura); o responsável pela elaboração do projeto de reabilitação (Projetista); o responsável pela execução da obra de reabilitação no terreno (Empreiteiro); e por fim, o utilizador dos serviços fornecidos (Utente).

Por forma a conduzir o processo de tomada de decisão foi, naturalmente, necessária a contribuição de uma parte conhecedora da metodologia MACBETH, tendo sido designado para o papel de facilitador o autor do presente trabalho.

5.3.1. Definição da árvore de valor

Após a devida identificação do problema existente, delineadas as alternativas e definidos os intervenientes no processo de tomada de decisão (especialistas e facilitador), encontram-se reunidas as condições necessárias para a definição da árvore de valor, identificação de objetivos e critérios, bem como dos níveis de desempenho e níveis de referência associados a cada um dos critérios. Para o efeito, foram realizadas conferências de decisão no LNEC que contaram com a participação do facilitador e dos especialistas.

É de registar que uma conferência de decisão é uma série de reuniões de trabalho intensivo que contam com a participação de um grupo de pessoas que revelam preocupações relacionadas com algumas questões complexas enfrentadas pela organização. Essas reuniões são compostas por facilitadores e especialistas. Os facilitadores moderam o debate, colocam algumas questões para promover o debate e pedem opiniões de todos os especialistas. Os especialistas dão as opiniões e o conhecimento sobre o problema, assegurando que seja alcançado um modelo necessário para o problema em mãos (Phillips, 2007).

Inicialmente estabeleceu-se o objetivo principal do estudo em desenvolvimento: *Determinação da solução de reabilitação da infraestrutura com melhor relação custo-benefício*. Com vista à satisfação deste objetivo principal foram sendo determinados os objetivos intermédios necessários para o efeito. Nesta sequência, cada objetivo intermédio é composto por determinados critérios. A Figura 5.17 ilustra uma fase inicial do processo acima descrito.

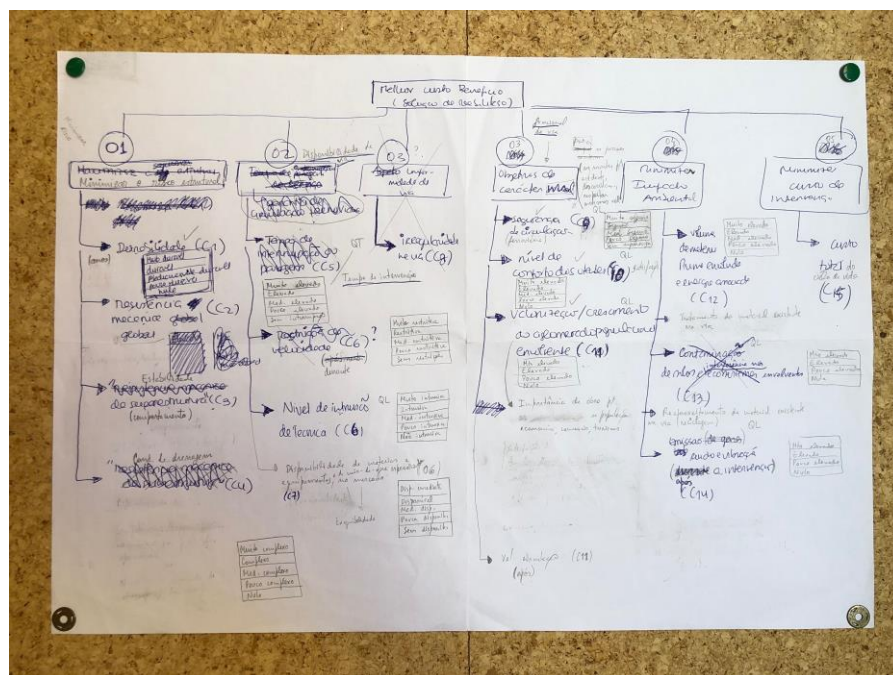


Figura 5.17 – Ilustração da fase inicial do processo de definição da árvore de valor

No decorrer do processo de definição da árvore de valor, identificaram-se e discutiram-se os parâmetros de análise – objetivos (O) e critérios (C) – aplicáveis a cada solução de reabilitação e definiram-se os níveis de desempenho e níveis de referência em que estes devem ser medidos e balizados, respetivamente. De salientar que, ao longo deste processo foi frequentemente questionada a existência de critérios semelhantes ou redundantes e, em caso afirmativo procedeu-se à sua fusão num só critério. Na Figura 5.18 encontra-se ilustrada a árvore de valor definitiva.

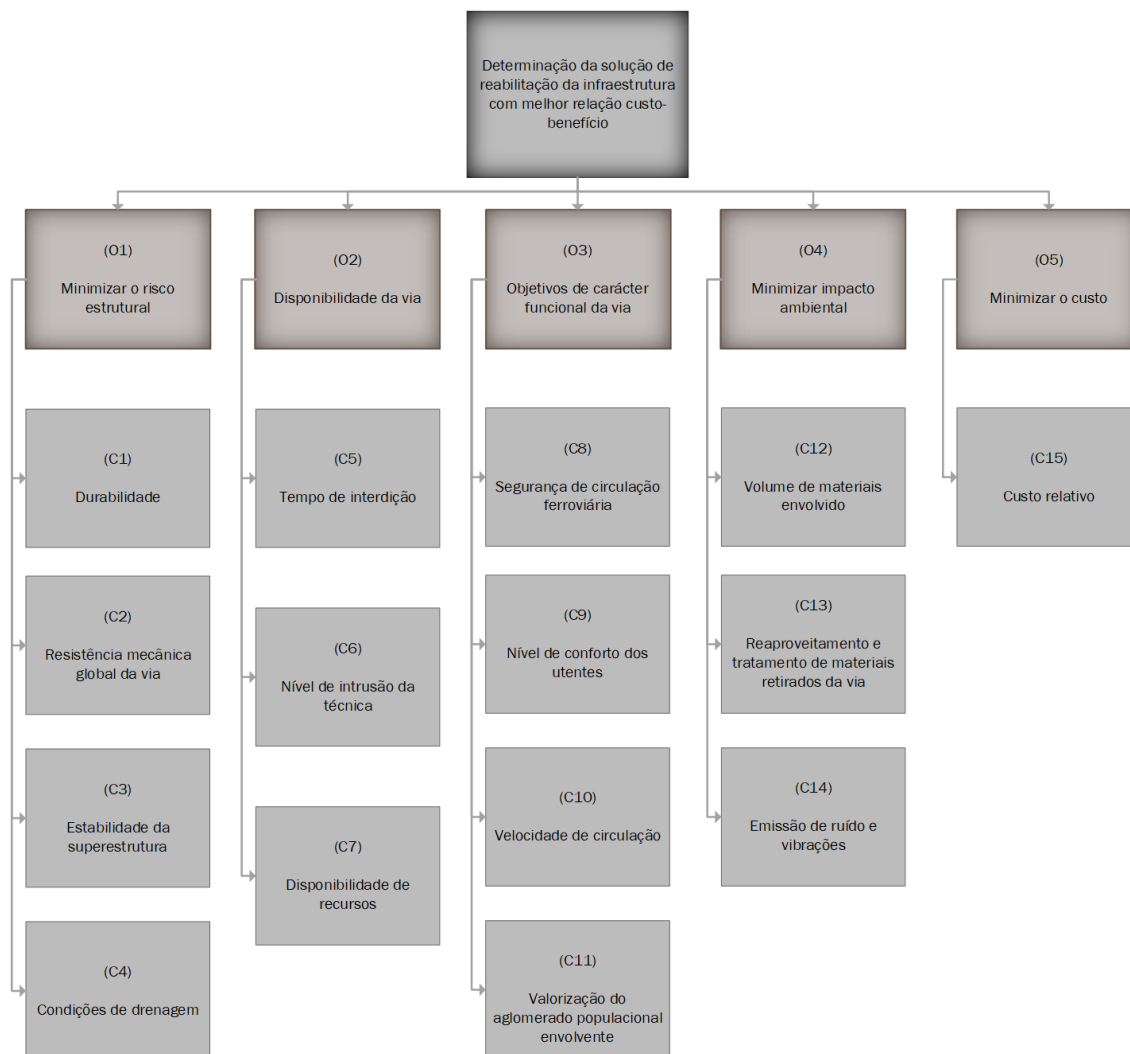


Figura 5.18 –Árvore de valor definitiva

Na Tabela 5.1 encontram-se todos os critérios apresentados acima, excetuando o critério “Custo relativo”, uma vez que, segundo esta metodologia, a sua incorporação apenas será importante na classificação das alternativas e na análise de resultados. Seguidamente, para cada critério foi realizada uma descrição do mesmo, definidos níveis de desempenho ou de performance, a sua base de comparação (neste caso, quantitativa ou qualitativa) e respetiva unidade (no caso quantitativo). Apresentam-se também, para cada critério, os níveis de referência inferior e superior a azul e verde, respetivamente. Como o próprio nome sugere, a associação destes níveis a determinado nível de desempenho serve para fazer referência aos níveis de performance cujo desempenho em determinado critério seja “neutro” (inferior) e “bom” (superior).

Tabela 5.1 – Lista de critérios

Critério 1: Durabilidade	
Descrição	Este critério refere-se à capacidade de preservação das características funcionais sem necessidade de manutenção ou reparação. Por outras palavras, a durabilidade corresponde ao inverso da degradação ao longo do tempo, estando por isso associada à velocidade com que esta se desenvolve. A escala quantitativa de C1 é expressa em intervalos de valores que correspondem à situação em que surge a necessidade de se voltar a intervir.
Níveis de performance	Quantitativa (unidade: número de anos): 0 – 5; 5 – 10; 10 – 15; 15 – 20; 20 – 25
Critério 2: Resistência mecânica global da via	
Descrição	A resistência mecânica global da via traduz-se pela capacidade de suporte face às solicitações externas sem que estas originem degradações. As solicitações externas devem-se fundamentalmente à passagem do material circulante. C2 pretende avaliar a relação existente entre a resistência mecânica antes e após a implementação da solução de reabilitação.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): elevada; medianamente elevada; média; baixa; muito baixa
Critério 3: Estabilidade da superestrutura	
Descrição	A superestrutura é convencionalmente composta pelo armamento da via: carris, sistemas de fixação, palmilhas elásticas e travessas; e ainda pela camada de balastro. A caracterização da estabilidade da superestrutura está fortemente associada aos padrões de qualidade dos parâmetros geométricos de via. C3 pretende avaliar as condições de estabilidade proporcionadas pelo armamento da via e camada de balastro após a reabilitação ferroviária.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): elevada; medianamente elevada; média; baixa; muito baixa
Critério 4: Condições de drenagem	
Descrição	Avalia o nível de eficiência da drenagem de águas que interfiram, tanto a nível da superestrutura como da subestrutura, no correto funcionamento da infraestrutura ferroviária.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): elevadas; medianamente elevadas; médias; baixas; muito baixas
Critério 5: Tempo de interdição	
Descrição	O tempo de interdição refere-se ao período em que se interrompe a circulação ferroviária de modo a existirem condições para o desenvolvimento dos trabalhos de reabilitação. É usual que os trabalhos sejam realizados durante a noite de modo a não interferir com a desejada circulação de comboios. Note-se que quanto mais duradora for a implementação da solução, maior será o período em que existirão restrições de velocidade de circulação. C5 pretende avaliar a influência da implementação de uma dada solução de reabilitação na correta operacionalidade da via-férrea.
Níveis de performance	Quantitativa (unidade: número de períodos noturnos): 0 – 5; 5 – 10; 10 – 15; 15 – 20; 20 – 40

Tabela 5.1 – Lista de critérios (continuação)

Critério 6: Nível de intrusão da técnica	
Descrição	Avalia, em termos percentuais, o grau de intrusão da técnica de reabilitação na infraestrutura ferroviária, isto é, a dimensão da intervenção. Tal pode ser obtido pela razão entre a(s) parte(s) da infraestrutura a reabilitar e a totalidade da constituição da infraestrutura.
Níveis de performance	Quantitativa (unidade: percentagem): 0 – 20; 20 – 40; 40 – 60; 60 – 80; 80 – 100
Critério 7: Disponibilidade de recursos	
Descrição	Para que uma solução de reabilitação seja exequível é necessário dispor de determinados recursos, tais como, materiais, mão-de-obra especializada e equipamentos. A falta de qualquer tipo de recursos pode causar fortes implicações a vários níveis, como por exemplo na calendarização de trabalhos. C7 pretende estimar a taxa de disponibilidade desses mesmos recursos.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): imediata; elevada; média; baixa; muito baixa
Critério 8: Segurança de circulação ferroviária	
Descrição	Avalia o grau de segurança fornecido aos utentes após a reabilitação ferroviária. Este critério procura contabilizar a segurança existente ao se respeitarem as normas de circulação. A não existência de condições adequadas de segurança pode originar a ocorrência de descarrilamentos, choques entre comboios e/ou choques de comboios com outros objetos.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): muito elevada; elevada; medianamente elevada; média; baixa
Critério 9: Nível de conforto dos utentes	
Descrição	Avalia a satisfação dos utentes no que respeita ao seu conforto em circulação após a execução da reabilitação da infraestrutura ferroviária.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): muito elevada; elevada; medianamente elevada; média; baixa
Critério 10: Velocidade de circulação	
Descrição	Avalia a relação existente entre a velocidade praticada antes e após a implementação da solução de reabilitação. C10 apresenta uma escala quantitativa percentual que varia entre os 0% e os 100%. Por exemplo, o valor de 20% corresponde a um aumento de 20% da velocidade após a intervenção.
Níveis de performance	Quantitativa (unidade: percentagem): 0 – 20; 20 – 40; 40 – 60; 60 – 80; 80 – 100
Critério 11: Valorização do aglomerado populacional envolvente	
Descrição	Uma obra de reabilitação ferroviária pode trazer benefícios económicos para o aglomerado populacional circundante, como por exemplo, no que respeita ao crescimento das transações comerciais e de turismo.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): muito elevada; elevada; medianamente elevada; média; baixa; muito baixa

Tabela 5.1 – Lista de critérios (continuação)

Critério 12: Volume de materiais envolvido	
Descrição	Os materiais surgem dum processo produtivo que inicia com a obtenção da matéria-prima no meio ambiente e termina num produto final. A este processo encontra-se associada uma determinada quantidade de energia despendida. Neste sentido, quanto maior a quantidade de materiais empregues, maiores serão as mudanças climáticas, maior será a contaminação atmosférica, provocando uma redução da biodiversidade e conduzindo a um esgotamento dos recursos naturais. Resumidamente, um maior volume de matéria-prima encontra-se associado a uma maior perturbação do meio ambiente.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): elevada; medianamente elevada; média; baixa
Critério 13: Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via	
Descrição	Avalia a possível taxa de reciclagem dos materiais existentes <u>antes</u> da reabilitação da via-férrea.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): elevada; medianamente elevada; média; baixa; nula
Critério 14: Emissão de ruído e vibrações	
Descrição	Avalia a emissão de ruído e vibrações por parte dos comboios em circulação <u>após</u> a implementação da solução de reabilitação.
Níveis de performance	Qualitativa (unidade: N/A): elevada; medianamente elevada; média; baixa; muito baixa

5.3.2. Classificação das alternativas relativamente aos critérios

O presente subcapítulo inicia com a apresentação da classificação das alternativas (Soluções de Reabilitação – SR) relativamente a cada um dos critérios (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Classificação das alternativas relativamente aos critérios

	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5
C1	3	10	12	18	22
C2	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
C3	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Median. Elev.
C4	Muito Baixas	Médias	Médias	Median. Elev.	Elevadas
C5	3	7	9	20	35
C6	15	50	50	70	90
C7	Elevada	Elevada	Média	Baixa	Muito Baixa
C8	Median. Elev.	Median. Elev.	Median. Elev.	Elevada	Elevada
C9	Média	Média	Média	Elevada	Elevada
C10	15	18	25	45	55
C11	Média	Média	Média	Elevada	Elevada
C12	Baixa	Baixa	Baixa	Median. Elev.	Median. Elev.
C13	Nula	Média	Média	Baixa	Média
C14	Média	Média	Média	Muito Baixa	Muito Baixa

Para esta etapa, e com o objetivo de se obter uma clara e correta classificação, recorreu-se às opiniões e conhecimento dos especialistas e do autor da presente dissertação. Para o primeiro critério, e respetivos níveis de desempenho, classificaram-se as cinco alternativas, repetindo-se o mesmo processo até se alcançar o último critério.

Enunciam-se brevemente alguns dos aspetos que contribuíram para a elaboração dessa mesma classificação: i) a SR1 (ataque da via) apresenta uma durabilidade bastante reduzida quando comparada com as restantes SR; ii) em termos de qualidade geométrica da via, nunca se consegue obter um nível satisfatório apenas realizando a SR1 ou SR2 (rebalastragem); iii) apenas a SR5 (RIV com reforço da subestrutura) é capaz de fornecer uma estabilidade máxima à via; iv) relativamente às condições de drenagem, a SR1 é a única que não atua a esse nível; v) o tempo de interdição é crescente com o nível de complexidade da SR; vi) a SR2 e SR3 (reforço com geossintéticos) apresentam igual nível de intrusão da técnica por atuarem ambas ao mesmo nível; vii) as técnicas desenvolvidas pelas SR1 e SR2 requerem recursos facilmente disponíveis, contrariamente à SR5; viii) relativamente à segurança de circulação, um máximo é atingido pelas SR4 (RIV) e SR5, enquanto que a SR1, SR2 e SR3 apresentam um desempenho inferior; ix) o mesmo se pode afirmar quanto ao conforto, mas com uma maior diferença entre os mesmos; x) melhorias significativas de velocidade de circulação são atingidas com a SR4 e SR5; xi) uma excelente valorização do aglomerado populacional apenas é conseguido com a SR4 e SR5; xii) a SR1, SR2 e SR3 requerem um baixo volume de materiais, contrariamente às SR4 e SR5; xiii) a técnica associada à SR1 não possibilita o reaproveitamento de nenhum material; xiv) um nível muito baixo de emissão de ruído e vibrações apenas é alcançado com a renovação dos elementos constituintes da superestrutura, isto é, com as SR4 e SR5.

O próximo passo corresponde à definição dos custos anuais envolvidos em cada alternativa (SR). De notar que, na análise multicritério segundo a metodologia MACBETH, não é obrigatória a introdução do custo real associado a cada alternativa, sendo suficiente conhecer apenas o custo anual relativo entre alternativas.

Neste sentido, definiu-se a SR1 como ponto de partida e determinou-se a relação de custos anuais existente entre esta e as restantes alternativas. Assim, em primeiro lugar definiu-se o custo unitário para a SR1 e prosseguiu-se com a determinação dos restantes, conforme apresenta a Tabela 5.3. Salienta-se que, para a concretização desta etapa se recorreu mais uma vez às opiniões e conhecimento dos especialistas.

Tabela 5.3 – Custo anual relativo das alternativas

	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5
Custo	1	1.5	2	5	8

5.3.3. Inquérito aos especialistas

O início do presente subcapítulo coincide com a conclusão da Fase de Estruturação da Análise Multicritério (conforme apresentado na Figura 5.16), onde existiu uma constante conciliação entre os 4 especialistas aquando da determinação da árvore de valor definitiva para o problema em causa.

Segue-se a etapa correspondente à Fase de Avaliação, em que os especialistas possuem, naturalmente, as suas divergências de opinião na obtenção das funções de valor associadas a cada critério e dos pesos de cada critério na análise do problema. Esta etapa é crucial dado que as funções de valor juntamente com a classificação das alternativas permitem obter a pontuação parcial de cada alternativa num dado critério.

Por sua vez, as pontuações parciais de cada alternativa quando conjugadas com os pesos de cada critério permitem obter as pontuações globais das alternativas. Por forma a que cada especialista fornecesse respostas mais perto daquela que é a sua real convicção, isto é, sem ser alvo da influência de um outro especialista mais defensor das suas ideias, propôs-se a seguinte metodologia que tem início com a elaboração de um inquérito para preenchimento individual (Figura 5.19).

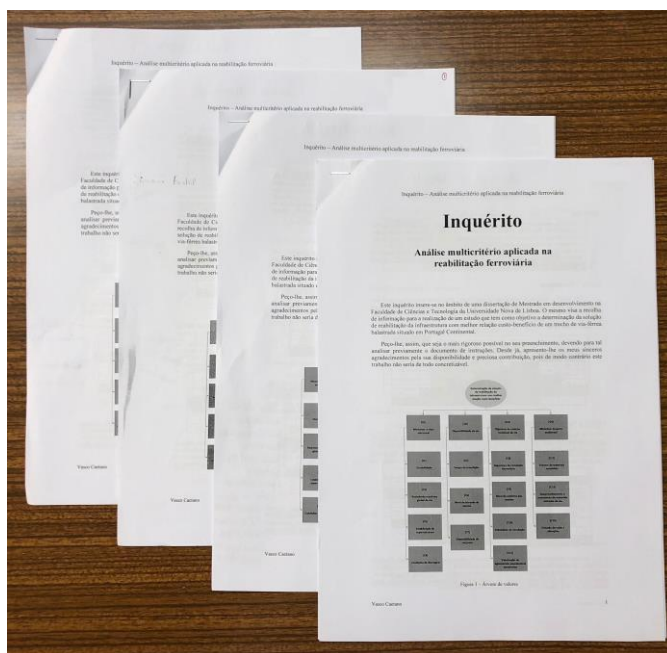


Figura 5.19 – Inquéritos destinados aos especialistas

Face à complexidade presente na metodologia MACBETH considerou-se conveniente elaborar um documento complementar intitulado “Instruções para o inquérito” (em **Anexo II**) com o objetivo de esclarecer quaisquer dificuldades sentidas por parte dos especialistas aquando do

processo de inquirição. Nesse documento, apresentam-se alguns conceitos e um exemplo prático resolvido semelhante ao inquérito proposto.

O inquérito (em **Anexo III**) é fundamentalmente constituído por três questões.

A primeira questão tem o propósito de se obterem as funções de valor associadas a cada critério, apresentando-se para o efeito os diversos critérios com a respetiva descrição para um melhor enquadramento. A função de valor associada a determinado critério é obtida efetuando-se comparações binárias (par-a-par) entre os níveis de performance, isto é, medir o nível de atratividade existente entre dois níveis de desempenho, atendendo à Escala semântica do MACBETH (Tabela 5.4). Como se efetuam comparações binárias entre níveis de performance, o número de perguntas corresponde à combinação do número de níveis de performance agrupados dois a dois. Por exemplo, um critério com 5 níveis de performance apresenta 10 comparações binárias. Considerando que existem 14 critérios e que cada comparação binária adota o seguinte modelo de pergunta “Qual é a diferença de atratividade existente entre os níveis de desempenho A e B para o critério 1?”, procurou-se sintetizar ao máximo todo o processo, isto é, simplificar a forma de inquirir e a posterior análise de resultados. Neste sentido, criou-se uma matriz quadrada por cada critério, isto é, uma matriz que apresenta um número igual de linhas e de colunas, coincidente com o número de níveis de performance desse critério. Importa ainda referir que se criou um “número de escala equivalente” na Escala semântica do MACBETH (Tabela 5.4) para o efeito de resposta à comparação binária efetuada em cada célula matricial.

Tabela 5.4 - Escala semântica do MACBETH

Escala semântica	Número de escala equivalente	Significado
Nula	0	Indiferença entre alternativas / Diferença de atratividade nula
Muito fraca	1	Uma alternativa é muito pouco atrativa face à outra
Fraca	2	Uma alternativa é pouco atrativa face à outra
Moderada	3	Uma alternativa é moderadamente atrativa face à outra
Forte	4	Uma alternativa é fortemente atrativa face à outra
Muito forte	5	Uma alternativa é muito fortemente atrativa face à outra
Extrema	6	Uma alternativa é extremamente mais atrativa face à outra

A segunda questão do inquérito vai ao encontro da necessidade de se verificar novamente a integridade da árvore de valor fixada, mais concretamente no que diz respeito à dualidade e dependência entre critérios, ou mesmo a sua inadequabilidade ou incompletude.

A terceira e última questão tem a finalidade de obter os pesos de cada critério. Assim, foi pedida a atribuição de uma pontuação compreendida entre 0 a 6 valores para cada um dos critérios, consoante o grau de importância e de relevância consentido pelo especialista.

Após o preenchimento dos inquéritos seguiu-se a etapa de tratamento e análise de respostas (Figura 5.20). Esta etapa encontra-se dividida em três pontos (i, ii e iii), uma vez que cada tipo de questão merece uma análise distinta e apropriada à sua essência. Importa ainda referir que se adotou uma análise empírica devido à subjetividade presente.

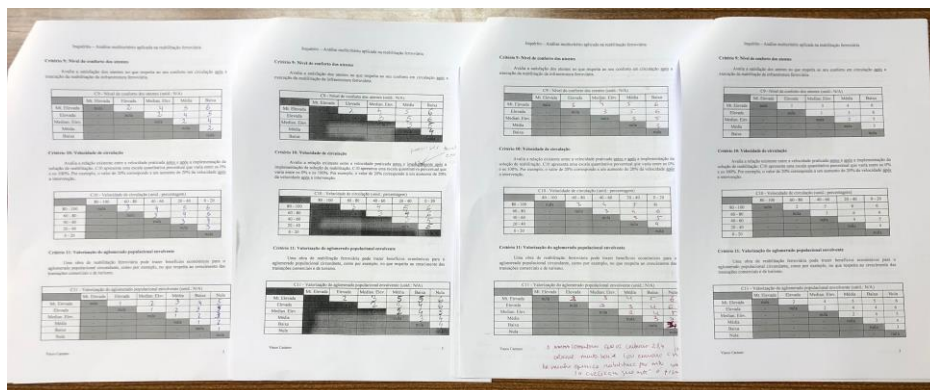


Figura 5.20 – Análise aos inquéritos preenchidos pelos especialistas

Análise de resultados:

i) Questão 1:

Com a análise desta questão pretende-se obter a Matriz de Facilitador, isto é, uma matriz representativa das respostas dos 4 especialistas. Assim, os 4 inquéritos foram analisados paralelamente com o foco numa dada célula. Outro aspeto a referir é que na observação das respostas deu-se ênfase ao teor de disparidade existente entre as mesmas. Neste sentido, propôs-se uma análise à primeira questão utilizando quatro métodos distintos, estando um esquema de cores associado a estes (Figura 5.21). Iniciou-se a análise pelo Método 1 até uma análise mais complexa, terminando-se assim no Método 4.

Método 1
Método 2
Método 3
Método 4

Figura 5.21 – Associação de cores aos métodos utilizados na análise de resultados

Nos casos em que as 4 respostas foram todas iguais (Método 1), fixou-se de forma evidente essa resposta como a representativa de todos.

Nos casos em que 3 das 4 respostas foram iguais (Método 2), admitiu-se existir uma preponderância significativa para se assumir essas 3 respostas em conformidade como representativa de todos.

Nos casos em que a resposta mais predominante surgiu duas vezes e, simultaneamente, se encontrava na média das respostas (Método 3), aplicou-se a média aritmética simples. O Método 3 abrange os seguintes casos de resposta (não necessariamente pela ordem apresentada): 1,2,2,3; 2,3,3,4; 3,4,4,5; 4,5,5,6; 1,3,3,5; e 2,4,4,6.

Por último, restaram as situações em que as respostas foram mais díspares e, como tal, sem qualquer convergência para uma dada resposta. Assim, para estes casos (Método 4) procurou-se identificar a relação de importância existente entre os especialistas e os objetivos (e respetivos

critérios). Decidiu-se aplicar pesos (em percentagens) às respostas dos inquiridos de 70%, 20% e 10% às relações de maior, média e menor importância, respetivamente (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Pesos atribuídos às respostas dos inquiridos por objetivo (Método 4)

Peso na decisão (%)	Gestor da Infraestrutura	Projetista	Empreiteiro	Utente
Objetivo 1	35	35	20	10
Objetivo 2	35	20	35	10
Objetivo 3	35	10	20	35
Objetivo 4	20	35	35	10

Face ao exposto, consideraram-se como mais ativos no Objetivo 1 (O1) o gestor da infraestrutura e o projetista, por apresentarem maior responsabilidade em caso de problemas estruturais e consequentemente, à fase de definição do projeto. De seguida, definiu-se que o empreiteiro e o utente teriam relações de média e menor importância, respetivamente.

No Objetivo 2 (O2), ao serem contemplados aspetos ligados à execução da obra de reabilitação, consideraram-se como mais ativos o empreiteiro e o gestor da infraestrutura. De seguida, definiu-se que o projetista e o utente teriam relações de média e menor importância, respetivamente.

No Objetivo 3 (O3) consideraram-se como mais ativos o utente e o gestor da infraestrutura, visto que este objetivo aborda aspetos fundamentalmente ligados ao sentimento de bem-estar do utente e devido à responsabilidade da existência ou não dessas mesmas condições ser maioritariamente atribuída ao gestor da infraestrutura. De seguida, definiu-se que o empreiteiro e o projetista teriam relações de média e menor importância, respetivamente.

Por último, no Objetivo 4 (O4) consideraram-se como mais ativos o empreiteiro e o projetista, uma vez que este objetivo refere-se a aspetos ligados às condições de realização da obra e também questões ambientais que, normalmente, são alvo de estudos de impacto afetos à fase de projeto. De seguida, definiu-se que o gestor da infraestrutura e o utente teriam relações de média e menor importância, respetivamente.

Com a utilização dos 4 métodos de análise foi possível obter a Matriz Representativa (ou Matriz de Facilitador) para todos os critérios. No entanto, nem todos os valores (em formato de “número de escala equivalente”) cumpriam os requisitos necessários para a introdução de dados no *software* M-MACBETH. Para este efeito, criou-se uma escala (Tabela 5.6) que permitiu balizar os valores obtidos em intervalos e, consequentemente, associá-los a uma categoria semântica.

Tabela 5.6 – Escala de retrocesso em concordância com o *software* M-MACBETH

Escala		
Intervalo	Categoria	Diferença de atratividade
0.0 - 0.49	0	Nula
0.50 - 1.24	1	Mt. Fraca
1.25 - 1.74	1.5	Mt. Fraca - Fraca
1.75 - 2.24	2	Fraca
2.25 - 2.74	2.5	Fraca - Moderada
2.75 - 3.24	3	Moderada
3.25 - 3.74	3.5	Moderada - Forte
3.75 - 4.24	4	Forte
4.25 - 4.74	4.5	Forte - Mt. Forte
4.75 - 5.24	5	Mt. Forte
5.25 - 5.74	5.5	Mt. Forte - Extrema
5.75 - 6	6	Extrema

As respostas dos especialistas, a matriz representativa e a matriz MACBETH para todos os critérios encontram-se no **Anexo IV**.

A título de exemplo, apresentam-se as respostas dos especialistas (Figura 5.22), a matriz representativa (Figura 5.23) e a matriz MACBETH (Figura 5.24) para o Critério 12. Recorda-se a utilização do esquema de cores em concordância com o ilustrado anteriormente na Figura 5.21.

Gestor da Infraestrutura	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	2	4	6
	Média	-	nula	2	4
	Median. Elev.	-	-	nula	2
Empreiteiro	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	4	6	6
	Média	-	nula	4	5
	Median. Elev.	-	-	nula	4
Projetista	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	5	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3
Utente	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	4	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3
Elevada	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	4	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3

Figura 5.22 – Respostas dos especialistas ao critério 12

Representativa	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	5.05	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3
Elevada	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
	Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	5.05	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3

Figura 5.23 – Matriz representativa do critério 12

Matriz MACBETH	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)			
		Baixa	Média	Median. Elev.
	Baixa	nula	3	5
	Média	-	nula	3
	Median. Elev.	-	-	nula
	Elevada	-	-	-

Figura 5.24 - Matriz MACBETH do critério 12

ii) Questão 3:

As respostas fornecidas a esta questão encontram-se no **Anexo IV**. Com a análise desta questão pretende-se obter a ordenação de critérios representativa dos 4 especialistas. Numa primeira fase (Caso 1), utilizou-se a metodologia empregue na questão 1, isto é, o conjunto de 4 métodos distintos, tendo-se verificado três situações de empate entre critérios, dois a dois. Perante este resultado, procurou-se realizar uma segunda análise (Caso 2) aplicando-se somente o Método 2 (média aritmética simples) utilizado na análise à questão 1, onde se pressupõe que todos os especialistas são igualmente importantes.

Neste caso, verificaram-se duas situações de empate entre critérios dois a dois e, uma situação de empate entre quatro critérios. Assim, procedeu-se a uma última análise (Caso 3) aplicando-se somente o Método 4 (pesos diferentes por objetivo) empregue na análise à questão 1. Neste último caso, verificou-se uma ordenação sem quaisquer situações de empate. Importa ainda referir que se realizaram três tipos de análise a esta questão, por forma a averiguar as diferenças de ordenação que poderiam daí resultar e, consequentemente, no resultado final obtido no *software* M-MACBETH.

A ordenação de critérios para os três casos encontra-se no **Anexo IV**. Outro aspeto a salientar é que a existência de empate entre critérios é, na realidade, admissível, pois para um dado problema podem existir critérios com pesos equivalentes.

Os resultados decorrentes dos três tipos de análise efetuada e a consequente ordenação de critérios encontram-se na Tabela 5.7 e Tabela 5.8, respetivamente.

Tabela 5.7 – Resultados obtidos pelos três casos de análise

		Pontuação		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3
O1	C1	6	6	6
	C2	5	5.25	5.35
	C3	5.45	5.5	5.45
	C4	4.45	4.25	4.45
O2	C5	5	5	4.9
	C6	4	4	3.85
	C7	4	3.75	3.65
O3	C8	5.3	5	5.3
	C9	4.75	4.25	4.75
	C10	5.05	4.75	5.05
	C11	3.8	3.75	3.8
O4	C12	3	3	2.9
	C13	3.7	3.75	3.7
	C14	3	3.75	3.3

Tabela 5.8 – Ordenação de critérios pelos três casos de análise

Ordenação de critérios		
Caso 1	Caso 2	Caso 3
C1	C1	C1
C3	C3	C3
C8	C2	C2
C10	C5/C8	C8
C2/C5	C5/C8	C10
C2/C5	C10	C5
C9	C4/C9	C9
C4	C4/C9	C4
C6/C7	C6	C6
C6/C7	C7/C11/C13/C14	C11
C11	C7/C11/C13/C14	C13
C13	C7/C11/C13/C14	C7
C12/C14	C7/C11/C13/C14	C14
C12/C14	C12	C12

Dos três casos de análise é possível observar que as principais prioridades dos especialistas são a durabilidade e a estabilidade da superestrutura e, logo de seguida, a resistência mecânica global da via, segurança de circulação ferroviária, tempo de interdição e velocidade de circulação. A estes seguem-se as condições de drenagem e o nível de conforto de utentes. Num patamar inferior encontram-se o nível de intrusão da técnica, a disponibilidade de recursos, a valorização do aglomerado populacional envolvente, assim como o reaproveitamento e tratamento de materiais retirados da via. No fim das suas prioridades encontram-se o volume de materiais envolvido e a emissão de ruído e vibrações.

Comparativamente aos países em desenvolvimento, esta ordenação revela uma maior preocupação com aspetos como o tempo de interdição, velocidade de circulação, nível de conforto dos utentes e o reaproveitamento e tratamento de materiais.

É também de referir que, logo após aos aspetos de ordem estrutural, a preocupação existente com o tempo de interdição e velocidade de circulação são semelhantes às existentes em países bastante desenvolvidos na área ferroviária, como por exemplo o Japão.

No entanto, apesar da crescente preocupação dos países desenvolvidos com os aspetos relacionados com o meio ambiente e respetiva sustentabilidade, pode-se constatar que estes foram contabilizados na análise multicritério, mas ocupam ainda uma posição de pouco destaque.

Neste sentido, pode afirmar-se que se está perante uma ordenação aparentemente coerente e que estas observações se aplicam ao contexto económico, político, social e ambiental de Portugal.

5.4. Utilização do *software* M-MACBETH

O presente subcapítulo pretende demonstrar o processo de incorporação dos resultados provenientes das respostas aos inquéritos na versão 3.2.0 do *software* M-MACBETH. Posteriormente, apresentam-se os resultados obtidos acompanhados de todas as análises efetuadas, por forma a ser possível discutir esses mesmos resultados. Por último, realizaram-se análises de sensibilidade no peso e de robustez do modelo realizado.

5.4.1. Introdução de dados

O primeiro passo foi a inserção da árvore de valor (Figura 5.25). Para tal, modificou-se a designação do Nó Global para a do objetivo principal do problema, criaram-se nós não-critério com as designações dos quatro objetivos do problema e, dentro de cada objetivo foram criados os nós critério correspondentes, isto é, os critérios incorporados por determinado objetivo.

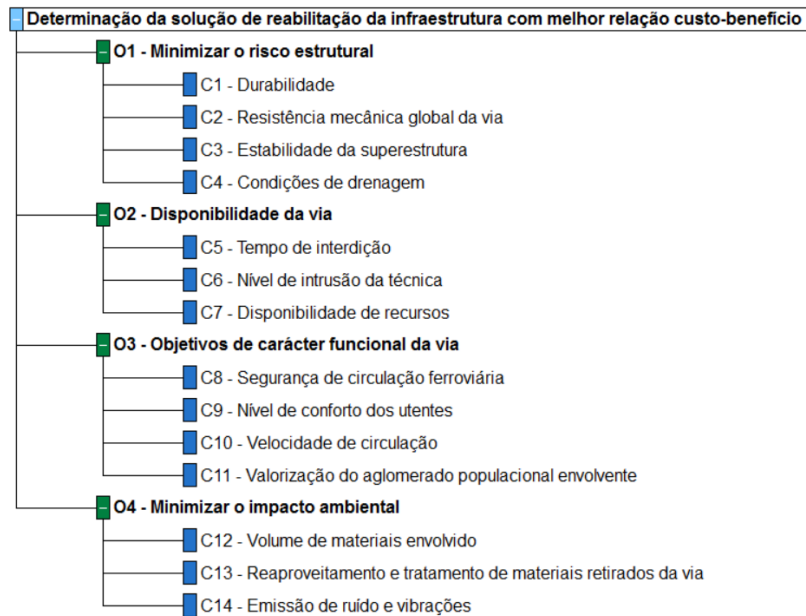


Figura 5.25 – Árvore de valor inserida no M-MACBETH

Através do menu “Opções – Definir” foram inseridas as alternativas e o custo relativo associado, conforme ilustra a Figura 5.26.

Opções

-	+	Nome	Nome abreviado	Custo
1		SR1 - Ataque da via	SR1	1
2		SR2 - Rebalastragem	SR2	1.5
3		SR3 - Reforço com geossintéticos	SR3	2
4		SR4 - Renovação integral da via	SR4	5
5		SR5 - Renovação integral da via com reforço da subestrutura	SR5	8

Inserir Remover Propriedades Performances

Figura 5.26 – Definição das alternativas e respetivo custo

O próximo passo consistiu na inserção da base de comparação dos níveis de performance (quantitativa ou qualitativa), níveis de referência e unidade associados a cada critério. Na Figura 5.27 demonstra-se o processo descrito para o caso do critério 1 e na Figura 5.28 encontra-se a lista de referências de ponderação.

A ilustração do mesmo processo para os restantes critérios encontra-se no **Anexo V**. Salienta-se que, o *software* M-MACBETH não permite a introdução de intervalos de valor nas bases quantitativas dos níveis de performance, mas apenas valores. Neste sentido, colocaram-se os valores médios desses intervalos. Refere-se ainda que, este detalhe não teve qualquer interferência nos resultados finais do problema, sendo apenas uma questão de representação.

Propriedades de C1 - Durabilidade

Nome: Nome abreviado:

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

Níveis de performance:

-	+	Nível quantitativo
1		22.5
2		17.5
3		12.5
4		7.5
5		2.5

Indicador:

Abreviado: Unidade:

Figura 5.27 – Propriedades do Critério 1

Referências de ponderação

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Referências globais	22.5	Elev.	Elevada	Elevadas	2.5	10	Imediata	Mt. Elev.	Mt. Elev.	90	Mt. Elev.	Baixa	Elevada	Mt. Baixa
[C1]	17.5	Median. Elev.	Median. Elev.	Median. Elev.	7.5	30	Elevada	Elevada	Elevada	70	Elevada	Média	Median. Elev.	Baixa
[C3]	12.5	Média	Média	Médias	12.5	50	Média	Median. Elev.	Median. Elev.	50	Median. Elev.	Median. Elev.	Média	Média
[C2]	7.5	Baixa	Baixa	Baixas	17.5	70	Baixa	Média	Média	30	Média	Elevada	Baixa	Median. Elev.
[C8]	2.5	Mt. Baixa	Mt. Baixa	Mt. Baixas	30	90	Mt. Baixa	Baixa	Baixa	10	Baixa		Nula	Elevada
[C10]											Mt. Baixa			
[C5]														
[C9]														
[C4]														
[C6]														
[C11]														
[C13]														
[C7]														
[C14]														
[C12]														
[tudo inf.]														

Figura 5.28 – Referências de ponderação

Num próximo passo introduziu-se a performance das alternativas relativamente a cada um dos critérios na tabela de performances (Figura 5.29) de acordo com o determinado anteriormente na Tabela 5.2. Para tal, usou-se o menu “Opções – Tabela de performances”.

Tabela de performances

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Opções														
SR1	3	Baixa	Baixa	Mt. Baixas	3	15	Elevada	Median. Elev.	Média	15	Média	Baixa	Nula	Média
SR2	10	Baixa	Baixa	Médias	7	50	Elevada	Median. Elev.	Média	18	Média	Baixa	Média	Média
SR3	12	Média	Média	Médias	9	50	Média	Median. Elev.	Média	25	Média	Baixa	Média	Média
SR4	18	Median. Elev.	Median. Elev.	Median. Elev.	20	70	Baixa	Elevada	Elevada	45	Elevada	Median. Elev.	Baixa	Mt. Baixa
SR5	22	Elev.	Median. Elev.	Elevadas	35	90	Mt. Baixa	Elevada	Elevada	55	Elevada	Median. Elev.	Média	Mt. Baixa

Figura 5.29 – Tabela de performances

Seguiu-se a introdução de julgamentos MACBETH de diferença de atratividade entre níveis de performance para todos os critérios. Neste sentido, acedeu-se à janela referente à matriz de julgamentos de um dado critério através de um duplo clique na árvore sobre esse mesmo critério. Em cada critério, este processo foi realizado em concordância com a matriz MACBETH obtida pela análise à questão 1 dos inquiridos. Após o preenchimento da matriz premiu-se o botão “Construir uma escala (MACBETH)”, situado na barra de ferramentas na parte inferior da janela da matriz, por forma a criar uma escala de pontuação MACBETH para o conjunto de julgamentos inseridos na matriz.

Na Figura 5.30 apresenta-se o processo descrito para o caso do critério 1 e a ilustração do mesmo relativamente aos restantes critérios encontra-se no **Anexo V**. Salienta-se que, o programa verificou e validou a consistência de julgamentos em todas as matrizes introduzidas, isto é, a não existência de quaisquer julgamentos incompatíveis. Não existindo inconsistências, o M-MACBETH determina, por programação linear, uma escala numérica que respeita todos os julgamentos dados.



Figura 5.30 – Julgamentos MACBETH de diferença de atratividade entre níveis de performance no critério 1

Relativamente às pontuações (ou níveis) de referência, mantiveram-se os valores por default (Figura 5.31), isto é, 0 e 100 para o nível de referência inferior (neutro) e superior (bom), respetivamente. Esta operação foi acedida através do menu “Ponderação – Pontuações de referência”.

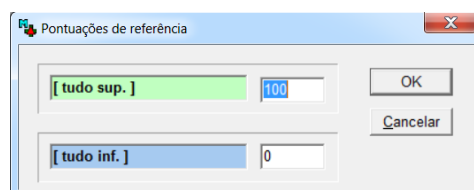


Figura 5.31 – Pontuações de referência

Num próximo passo, e considerando a existência de três casos distintos de ordenação de critérios (Tabela 5.8) decorrentes da questão 3 dos inquéritos, tornou-se necessário guardar o modelo até aqui construído em três ficheiros diferentes. Desta forma, de acordo com a Tabela 5.8 e através do menu “Ponderação – Julgamentos”, elaborou-se em cada modelo uma matriz de julgamentos entre critérios, isto é, ordenaram-se os critérios por ordem decrescente de atratividade global. Em cada um dos casos, e após o preenchimento da matriz, premiu-se o botão “Construir uma escala (MACBETH)”, situado na barra de ferramentas na parte inferior da janela da matriz, por forma a criar uma escala de pesos MACBETH para a ordenação de critérios inserida na matriz. No **Anexo V** encontram-se, para os três casos, a matriz de ponderação preenchida e a escala de pesos MACBETH gerada. Salienta-se que, para os três casos, o programa verificou e validou a consistência de julgamentos das matrizes, isto é, a não existência de quaisquer julgamentos incompatíveis. Não existindo inconsistências, o M-MACBETH determina, por programação linear, uma escala numérica que respeita todos os julgamentos dados.

5.4.2. Apresentação e discussão de resultados do modelo

Previamente a uma análise mais profunda dos resultados, achou-se conveniente observar o grau de disparidade de pontuações globais atribuídas a cada uma das alternativas para os três casos. Neste sentido, e através do menu “Opções – Termómetro global”, acedeu-se ao termómetro global (Figura 5.32), procedeu-se à elaboração de um gráfico (Figura 5.33) e de uma tabela (Tabela 5.9) com o cálculo das diferenças e desvio-padrão existentes entre pontuações globais de alternativas.

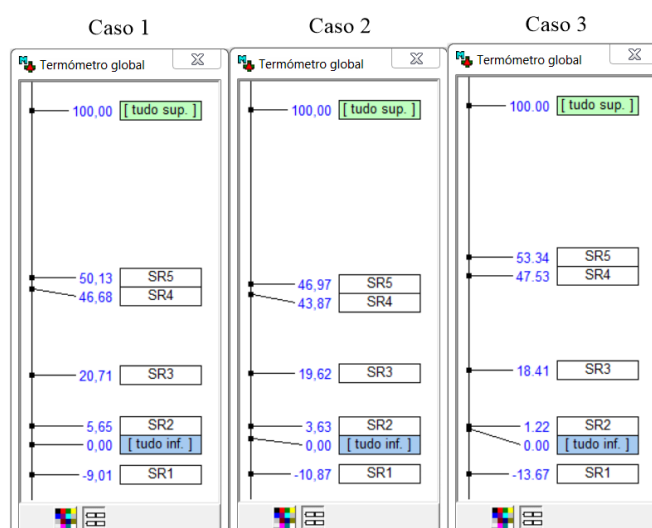


Figura 5.32 – Termómetro global para os casos 1, 2 e 3

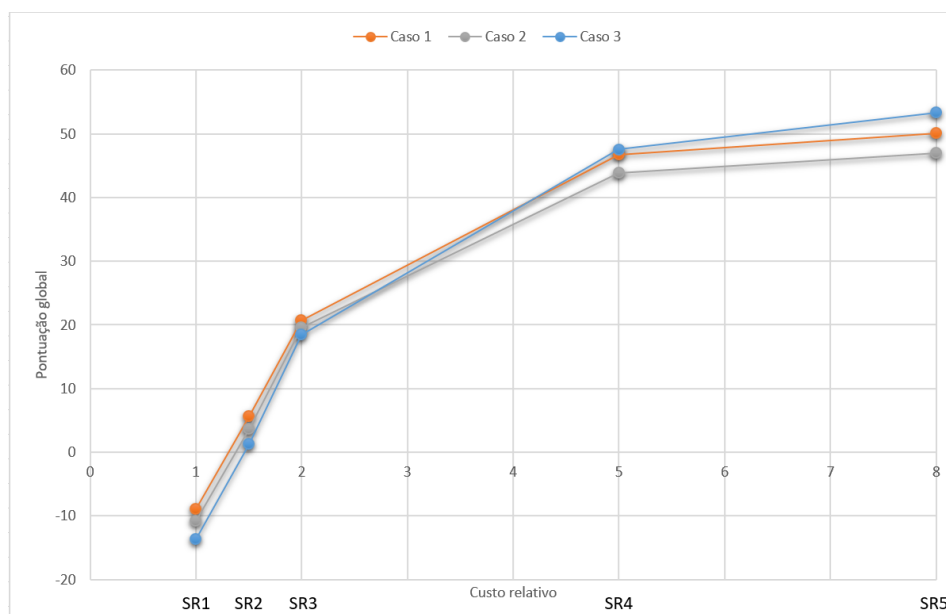


Figura 5.33 – Comparação entre pontuações globais de alternativas geradas para os casos 1, 2 e 3

Tabela 5.9 – Diferença e desvio-padrão entre pontuações globais de alternativas para os três casos

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Desvio Padrão
SR2 - SR1	14.66	14.5	14.89	0.196
SR3 - SR2	15.06	15.99	17.19	1.068
SR4 - SR3	25.97	24.25	29.12	2.470
SR5 - SR4	3.45	3.1	5.81	1.474

Conforme se pode analisar pelas Figura 5.32 e Figura 5.33, assim como pela Tabela 5.9 constatou-se que para os distintos casos: i) a ordenação de alternativas é idêntica; ii) o intervalo de valores entre pontuações globais para as distintas alternativas praticamente não difere, excetuando entre a SR3 e a SR4, onde este é ligeiramente mais acentuado; iii) o raciocínio anterior aplica-se ao desvio-padrão entre ambas alternativas; iv) a pontuação mais baixa e mais elevada são ambas atingidas pelo caso 3, isto é, a amplitude entre estas é máxima para esse caso.

Com base nesta análise, considerou-se que as diferenças existentes não eram suficientemente significativas e justificativas para se proceder com uma análise mais profunda por três vias pouco distintas. Neste sentido, optou-se pelo caso 3 na continuidade do processo de análise de resultados. No entanto, alguns dos resultados afetos aos casos 1 e 2, mais especificamente o gráfico Custo/Benefício e a tabela de pontuações, encontram-se disponíveis no **Anexo V**.

Na Tabela 5.10 apresenta-se a tabela de pontuações onde é possível analisar as pontuações parciais e globais de alternativas, assim como os pesos associados a cada um dos critérios. A tabela de pontuações apresenta a lista de alternativas (ou opções) por ordem descendente (de cima para baixo) de atratividade global, isto é, da mais globalmente atrativa para a menos glo-

balmente atrativa. As pontuações parciais de cada alternativa face a cada critério encontram-se na intersecção dos critérios com as alternativas (ou opções). Por exemplo, a pontuação parcial da alternativa SR3 no critério 1 (C1) é de 54,00.

As pontuações globais de cada alternativa encontram-se na coluna “Global” de fundo amarelo. Por exemplo, a pontuação global da alternativa SR3 é de 18,41. Por último, os pesos de cada critério encontram-se na linha inferior da tabela “Pesos”. Por exemplo, o peso do critério 1 (C1) é de 0,1333, sendo de referir que a soma dos pesos MACBETH é igual à unidade.

Tabela 5.10 - Tabela de pontuações

Opções	Global	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
[tudo sup.]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SR5	53,34	154,00	100,00	66,67	100,00	-155,00	-116,67	-50,00	50,00	66,67	110,72	100,00	-100,00	33,33	100,00
SR4	47,53	106,00	50,00	66,67	50,00	-65,00	-50,00	0,00	50,00	66,67	89,29	100,00	-100,00	0,00	100,00
SR3	18,41	54,00	0,00	0,00	0,00	35,00	0,00	66,67	0,00	0,00	42,86	0,00	100,00	33,33	0,00
SR2	1,22	30,00	-75,00	-50,00	0,00	55,00	0,00	100,00	0,00	0,00	22,86	0,00	100,00	33,33	0,00
[tudo inf.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SR1	-13,67	-54,00	-75,00	-50,00	-125,00	95,00	87,50	100,00	0,00	0,00	14,29	0,00	100,00	-44,44	0,00
Pesos :		0,1333	0,1143	0,1238	0,0667	0,0857	0,0571	0,0286	0,1047	0,0762	0,0952	0,0476	0,0096	0,0381	0,0191

“[tudo inf.]” representa uma referência global com performances nos critérios iguais às respectivas referências inferiores (definidas como “neutro” a azul). “[tudo sup.]” representa uma referência global com performances nos critérios iguais às respectivas referências superiores (definidas como “bom” a verde). Ambas são referências de atratividade global intrínseca (Bana e Costa et al., 2017).

Como tal, pode-se afirmar que uma alternativa cujo desempenho em todos os critérios (pontuações parciais) fosse de “neutro” ou “bom”, esta atingiria uma pontuação global de 0 ou 100, respetivamente. Neste sentido, “[tudo inf.]” e “[tudo sup.]” apresentam esses mesmos valores de pontuação global, respetivamente. De notar que, existem outras possibilidades para se obter essa mesma pontuação global, de acordo com a relação entre os pesos atribuídos e pontuações parciais.

Considerando que para cada critério foi criada uma função de valor com base nos julgamentos dos especialistas, que esta se encontra ancorada aos valores de 0 e 100 e que as alternativas foram também classificadas relativamente aos critérios, é possível realizar um paralelismo entre a pontuação parcial das alternativas e as referências de atratividade global intrínseca.

Pode-se então afirmar que num dado critério: i) uma alternativa cuja pontuação parcial é negativa, indica que o seu desempenho é inferior ao fixado como “neutro” (associado a “[tudo inf.]”); ii) uma alternativa cuja pontuação parcial é nula, indica que o seu desempenho é idêntico ao fixado como “neutro”; iii) uma alternativa cuja pontuação parcial é positiva e inferior a 100, indica que o seu desempenho se encontra balizado entre o fixado como “neutro” e “bom” (associado a “[tudo sup.]”); iv) uma alternativa cuja pontuação parcial é de 100, indica que o seu

desempenho é idêntico ao fixado como “bom”; v) uma alternativa cuja pontuação parcial é positiva e superior a 100, indica que o seu desempenho é superior ao fixado como “bom”.

De modo idêntico ao anterior, aplica-se igualmente o mesmo raciocínio entre a pontuação global das alternativas e as referências de atratividade global intrínseca.

Esta tabela de *ranking* final (Tabela 5.10) foi apresentada aos especialistas para discussão e posterior validação. Previamente ao início da análise de resultados, salienta-se que nesta tabela apenas são considerados os “benefícios” sem qualquer consideração do fator “custo”. Numa primeira abordagem aos resultados apresentados, vale a pena ressaltar que nenhuma alternativa obteve uma pontuação global igual ou superior a 100, o que significa que o grau de exigência é elevado e que existem, no máximo, alternativas que respondem, em termos globais, satisfatoriamente bem ao conjunto de critérios considerados no problema.

A SR1 é uma alternativa a excluir automaticamente por não apresentar efeitos globais benéficos (pontuação global negativa), correspondendo por isso a uma perda de investimento. De modo semelhante, a SR2 apresenta uma pontuação global positiva, mas muito baixa. Assim, estas duas alternativas não apresentam resultados visíveis de reabilitação ao não conferirem praticamente efeitos positivos na minimização do risco estrutural, mas pressupõem um gasto de verba. Neste momento, considera-se que as alternativas SR1 e SR2 não são viáveis ao problema em mãos, tendo em conta o perfil dos especialistas e o estado da infraestrutura ferroviária. Por outro lado, a terceira alternativa (SR3) exibe uma pontuação global satisfatória, ao passo que a SR4 e SR5 se destacam por exibirem as maiores pontuações globais de entre as restantes, sendo a diferença de desempenho entre estas duas últimas consideravelmente pequena.

Relativamente aos pesos associados aos critérios, estes advêm da ordenação de critérios por parte dos especialistas. Alguns comentários afetos a esta questão foram previamente realizados no final do subcapítulo 5.3.3. Todavia, uma vez que os critérios nascem dos objetivos, elaborou-se a Tabela 5.11 por forma a determinar os pesos (automaticamente) associados aos objetivos do problema.

Tabela 5.11 – Tabela de pesos por critérios e objetivos

Objetivos	Critérios	Pesos	
O1	C1	0.1333	0.4381
	C2	0.1143	
	C3	0.1238	
	C4	0.0667	
O2	C5	0.0857	0.1714
	C6	0.0571	
	C7	0.0286	
O3	C8	0.1047	0.3237
	C9	0.0762	
	C10	0.0952	
	C11	0.0476	
O4	C12	0.0096	0.0668
	C13	0.0381	
	C14	0.0191	
Somatório		1	1

Observa-se que a minimização do risco estrutural (O1) é a principal preocupação dos especialistas, apresentando um peso de 43,81%. Seguem-se os objetivos de carácter funcional da via (O3) também com um peso considerável e a disponibilidade da via (O2), sendo dada menor relevância à minimização do impacto ambiental (O4).

Na Figura 5.34 apresenta-se o perfil ponderado das alternativas SR3, SR4 e SR5. Cada barra do perfil ponderado corresponde ao produto da pontuação da alternativa no critério respetivo pelo peso desse critério. A título de exemplo, a SR3 apresenta o valor de 7,20 no C1 que resulta do produto da pontuação da alternativa nesse critério (54,00) pelo peso desse critério (0,1333). Assim, o perfil ponderado permite analisar as contribuições individuais das pontuações da alternativa nos critérios para a pontuação global da alternativa (apresentada à direita do ícone de peso). No **Anexo V** encontram-se os perfis ponderados das cinco alternativas.

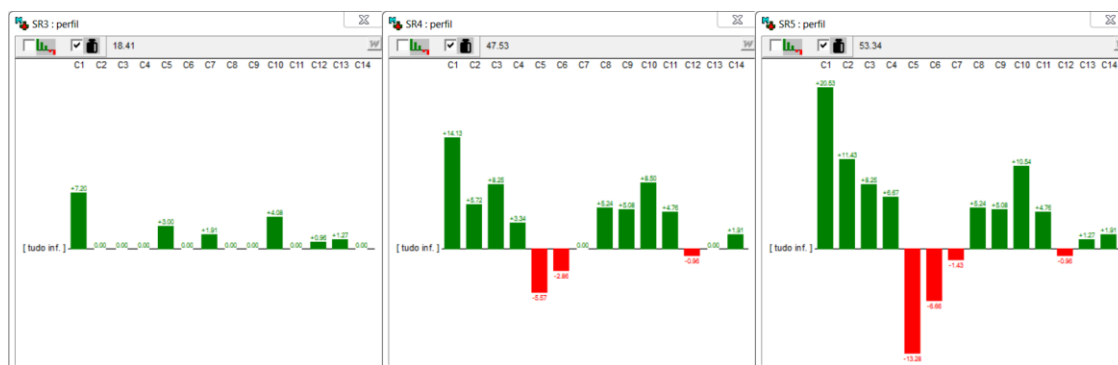


Figura 5.34 – Perfil ponderado das alternativas SR3, SR4 e SR5

É possível constatar que, de acordo com o referido anteriormente, a SR1 e SR2 têm fundamentalmente pontuações parciais ponderadas desfavoráveis nos aspetos estruturais (excetuando a SR2 no C1). Observa-se que a SR3 apenas apresenta desempenhos “neutros” e positivos: “neutro” em oito critérios e positivo em seis, sendo eles a durabilidade (C1), tempo de interdição (C5), disponibilidade de recursos (C7), velocidade de circulação (C10), volume de materiais envolvido (C12) e reaproveitamento e tratamento de materiais retirados da via (C13). Relativamente à SR4 e SR5, observa-se que o pior desempenho destas alternativas está associado ao objetivo de disponibilidade da via e também ao critério volume de materiais envolvido (C12). Por outro lado, estas alternativas apresentam sempre um desempenho positivo nos critérios respeitantes aos dois objetivos mais valorizados por parte dos especialistas: O1 e O3.

Uma outra funcionalidade desta metodologia é a possibilidade de se analisar as diferenças ponderadas de pontuações entre quaisquer duas alternativas. Para tal, acedeu-se ao menu “Opções – Perfis de diferenças” e criaram-se diferentes perfis, em que para cada perfil se selecionaram as duas alternativas pretendidas. Considerando a análise de resultados elaborada até esta etapa, achou-se apropriado balizar as possibilidades e, assim, comparar os seguintes pares de

alternativas: SR3 e SR4; SR4 e SR5; SR3 e SR5. Estes perfis de diferenças ponderadas encontram-se na Figura 5.35. A título de exemplo, utilizou-se o perfil SR3 – SR4 para apresentar alguns conceitos. É possível observar que no topo é indicada a diferença de pontuação global das alternativas SR4 e SR3 que, neste caso, é de 29,12. Em geral, as barras mostram as diferenças ponderadas de pontuações nos critérios entre a SR4 e a SR3. Assim, as diferenças positivas (barras verdes) e negativas (barras laranjas) correspondem, respetivamente, aos critérios em que as performances da SR4 são mais e menos atrativas que as performances da SR3. Uma diferença nula significa que as duas opções são igualmente atrativas no critério respetivo.

Desta forma, as barras de diferenças ponderadas permitem analisar em que medida as diferenças em favor da primeira das duas opções selecionadas compensam, ou não, as diferenças em favor da segunda opção (Bana e Costa et al., 2017).

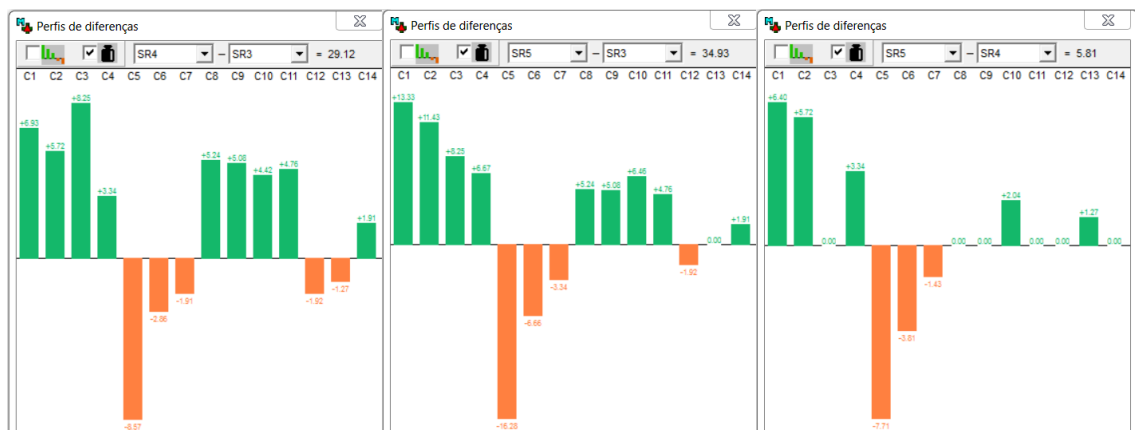


Figura 5.35 – Perfil de diferença ponderada entre pares de alternativas: SR4 com SR3, SR5 com SR3 e SR5 com SR4

Iniciando a análise pelos dois primeiros perfis, verifica-se que a SR3 apresenta um desempenho inferior à SR4 e SR5, no que respeita a todos os critérios incorporados pelos objetivos 1 e 3, sendo esta a principal razão pela qual SR4 e SR5 possuem uma pontuação global notoriamente superior à de SR3. De modo contrário, a SR3 apresenta um desempenho superior às outras duas, no que respeita a todos os critérios incorporados pelo objetivo 2. No entanto, no que respeita ao objetivo 4 existe uma maior aproximação entre as alternativas. Relativamente ao último perfil apresentado, verifica-se que a SR5 é superior à SR4 em três dos quatro critérios respeitantes à minimização do risco estrutural, tendo igual desempenho no C3. Verifica-se também que a SR4 apresenta um desempenho superior à SR5, no que respeita a todos os critérios incorporados pelo objetivo 2. Relativamente aos objetivos 3 e 4, estas duas alternativas apresentam diversos empates, com exceção do C10 e C13, em que SR5 é superior. Assim, pode-se afirmar que a SR5 é ligeiramente (5,81) superior à SR4. Por último, deve-se realizar uma ACB previamente a mais ilações entre as três alternativas.

Aproveitando as potencialidades do *software*, realizaram-se quatro gráficos bidimensionais de custo-benefício, que contrastam a pontuação parcial de cada alternativa num dado objetivo (benefício) com o seu respetivo custo (Figura 5.36). Realizou-se ainda um quinto gráfico bidimensional de custo-benefício, desta vez contrastando a pontuação global de cada alternativa (benefício) com o seu respetivo custo (Figura 5.37). Salienta-se que, nos gráficos apresentados ativaram-se dois comandos: “mostrar as alternativas eficientes” e “fronteira de eficiência” e essas mesmas alternativas também a vermelho. As alternativas eficientes (e, portanto, que se encontram na fronteira de eficiência) correspondem às alternativas não dominadas em termos custo-benefício.

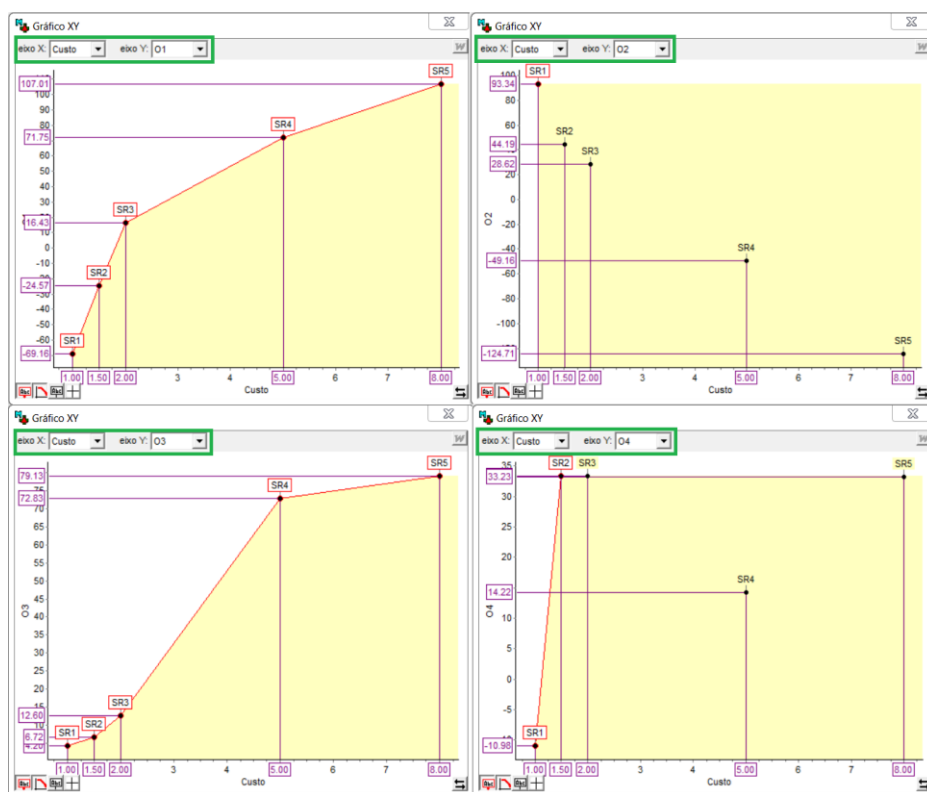


Figura 5.36 – Gráficos Custo – Pontuação parcial das alternativas num dado objetivo: O1, O2, O3 e O4

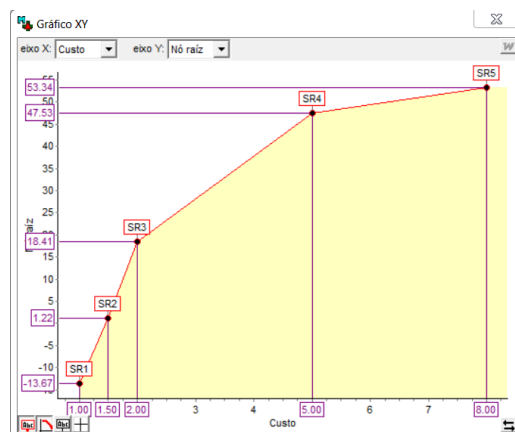


Figura 5.37 – Gráfico Custo – Pontuação global das alternativas

Constatou-se pela Figura 5.36, que nos objetivos 1 e 3, a fronteira de eficiência coincide com a união de todas as alternativas, dado que da primeira à última alternativa houve, simultaneamente, um aumento da pontuação parcial e custo. No objetivo 1, SR1 e SR2 têm desempenho negativo, SR4 e SR5 ótimo desempenho e, por último, SR3 um desempenho baixo relativamente às duas últimas. É de salientar que, SR5 ultrapassa o patamar de 100, o que indica que é uma alternativa muito eficiente em termos estruturais, contrariamente à SR1 e SR2. No objetivo 3, todas as alternativas obtiveram pontuações globais positivas. Todavia, verifica-se que SR1, SR2 e SR3 têm um baixo desempenho neste objetivo, contrariamente à SR4 e SR5. As duas últimas alternativas mostram-se eficientes, fundamentalmente, no que respeita à segurança, conforto e melhoria da velocidade de circulação. Estas diferem entre si por apenas 6,3. No objetivo 2 apenas SR1 se apresenta como eficiente, visto que as restantes têm um pior desempenho associado a um maior custo. Tal deve-se à menor necessidade de recursos e à facilidade e rapidez de execução associados a SR1. Por outro lado, SR4 e SR5 apresentam pontuações negativas, visto serem alternativas que necessitam de mais recursos, tempo e por serem soluções de maior complexidade na hora de executar. Relativamente ao objetivo 4, apenas as alternativas SR1 e SR2 são eficientes, visto que as restantes alternativas têm um desempenho igual, mas com um maior custo associado (SR3 e SR5), ou um desempenho limitado entre as duas primeiras alternativas, mas com um custo superior ao de estas (SR4).

Na Figura 5.37 observa-se que a fronteira de eficiência coincide com a união de todas as alternativas, dado que da primeira à última alternativa houve, simultaneamente, um aumento da pontuação global e custo. SR4 e SR5 destacam-se pelos seus elevados desempenhos globais e proximidade, diferindo estas por 5,81. A SR3 apresenta uma diferença considerável de desempenho face às duas últimas, mas também de custo. Neste sentido, sentiu-se a necessidade de compreender melhor as relações custo-benefício associadas a cada alternativa e, seguidamente, encontrar um termo de comparação entre estas. Assim, elaborou-se a Tabela 5.12, onde se colocaram os benefícios (pontuação global) e custo relativo, tendo-se procedido ao cálculo da relação Benefício/Custo. Numa primeira análise, e relativamente às alternativas SR1 e SR2, man-

têm-se os comentários efetuados anteriormente, isto é, que não são alternativas viáveis ao problema em mãos, tendo em conta o perfil dos especialistas e o estado da infraestrutura ferroviária. Por outro lado, a relação B/C da SR5 realça que a diferença de desempenho face à diferença de custo das duas anteriores (SR3 e SR4) não é compensatória. Por último, SR3 e SR4 apresentam as melhores relações custo-benefício, diferindo muito pouco entre si. Assim, pode-se afirmar que um melhor proveito associado a um menor custo pode ser conseguido mediante uma destas duas soluções de reabilitação.

Tabela 5.12 – Relação de proporcionalidade direta (Custo-Benefício)

Alternativas	Benefício (P.G.)	Custo	Relação B/C
SR1	-13.67	1	-13.67
SR2	1.22	1.5	0.81
SR3	18.41	2	9.21
SR4	47.53	5	9.51
SR5	53.34	8	6.67

Face ao anteriormente exposto, assume-se que quanto mais danificada a estrutura estiver, maiores os benefícios de a repor à situação inicial de construção ou de a reabilitar. Assim, o resultado do processo de decisão é, após a ordenação das alternativas, a escolha de uma ou mais alternativas com os valores mais elevados de pontuação global e, simultaneamente, melhor relação B/C. Como referido anteriormente, verificou-se que a SR4 apresenta um melhor desempenho nos objetivos com maior peso associado (O1 e O3) face à SR3. Neste sentido, caso fosse solicitado ao autor do presente documento a escolha entre SR3 e SR4, este optaria pela SR4.

5.4.3. Análises de sensibilidade no peso e de robustez do modelo

Antes de validar o modelo proposto, tornou-se necessário elaborar algumas análises, no sentido de apurar a consistência dos resultados obtidos.

Neste sentido, o próximo passo no processo de análise de decisão é realizar uma análise de sensibilidade sobre o peso de um dado critério, no sentido de apurar se a solução do problema é sensível aos julgamentos do decisor sobre a diferença de valor entre os diferentes critérios. Assim, é usual recorrer-se à análise de sensibilidade no peso de um critério para verificar em que medida a ordenação final das alternativas resulta alterada ao se variar o peso de um critério, mantendo, simultaneamente, as relações de proporcionalidade entre os restantes pesos. De realçar que, esta análise é também importante por permitir contemplar as hesitações manifestadas pelos especialistas (Bana e Costa et al., 2017).

No **Anexo V** encontram-se as figuras correspondentes à análise de sensibilidade no peso para todos os critérios. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 5.38 a análise de sensibilidade no

peso de C7. No canto superior esquerdo é possível selecionar o critério que se pretende analisar. Optou-se por representar apenas as alternativas que apresentam melhor relação custo-benefício (SR3 e SR4) por forma a facilitar a análise gráfica. O eixo vertical representa a pontuação global e o eixo horizontal o peso do critério em análise (em termos percentuais). Cada linha preta do gráfico exibe a variação da pontuação global da alternativa correspondente quando o peso do critério varia entre 0% a 100%. A linha vermelha vertical no gráfico representa o peso atual do critério em análise que, neste caso, corresponde a 2,86%. Note-se que, quando as linhas de duas alternativas não se intersectam, tal significa que uma das alternativas é sempre mais atrativa que a outra independentemente do peso do critério. Ao se analisar as ordenadas dos pontos iniciais e finais das retas de pontuação global nos diversos critérios, verifica-se que, os critérios C1, C5, C6, C11, C12 e C14 apresentam maiores declives, fruto de possuírem uma escala de variação maior. Assim, estes são os critérios mais sensíveis aquando da variação do seu peso.

No entanto, para o exemplo fornecido (Figura 5.38) é possível visualizar a intersecção das linhas de SR3 e SR4. Tal significa que: i) para um peso inferior a 32,4% no C7, a SR4 é mais atrativa que SR3; ii) para um peso superior a 32,4% no C7, a SR3 é mais atrativa que SR4; iii) o peso de indiferença global entre SR3 e SR4 é 32,4%, apresentando ambas uma pontuação global de 33,1. Considerando a maior ou menor proximidade entre o peso atual e o de indiferença global de um determinado critério, pode-se constatar quais os critérios mais ou menos suscetíveis de, com uma pequena variação de peso, se tornarem rapidamente atrativos noutra alternativa. Assim, após analisar os resultados obtidos para todos os critérios constatou-se que: i) SR4 é sempre mais atrativa que SR3 nos critérios C1, C2, C3, C4, C8, C9, C10, C11 e C14, independentemente da variação do peso desse critério; ii) as duas alternativas intersectam-se num ponto notavelmente distante do peso atual desse critério para os critérios C5, C6, C7, C12 e C13. Atendendo às ilações anteriormente feitas, constata-se que não existem critérios que, com uma pequena variação de peso, façam alterar drasticamente as pontuações globais destas duas alternativas.

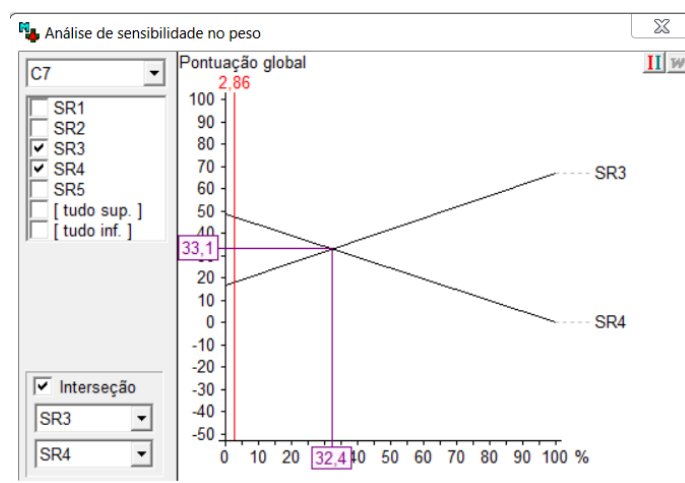


Figura 5.38 – Análise de sensibilidade no peso do C7

Como referido, durante o processo de validação do modelo foram realizadas análises de sensibilidade para todos os critérios existentes, tornando-se possível afirmar que o modelo é suficientemente forte para uma correta discriminação das SR. Não obstante, importa lembrar que as análises de sensibilidade lidam com variações isoladas dos pesos dos critérios, pelo que foi necessário recorrer a outro tipo de análises.

A tomada de decisão envolve, com frequência, informação escassa, imprecisa ou incerta. Pode ser útil, por isso, analisar que conclusões robustas se podem extrair do modelo para níveis variados de escassez, imprecisão ou incerteza na informação (Bana e Costa et al., 2017). Assim, a análise seguinte foi dirigida à robustez do modelo. A análise de robustez caracteriza-se por tratar em simultâneo os coeficientes de ponderação dos critérios, contrariamente ao que acontece com a análise de sensibilidade (onde só varia o peso de um critério e se mantém constantes os demais).

O *software* M-MACBETH organiza a informação que é introduzida no modelo em três tipos (“ordinal”, “MACBETH” e “cardinal”) e duas secções (“Informação local” e “Informação global”). A informação ordinal refere-se somente à classificação (i.e. ordenação), excluindo qualquer informação relativa a diferenças de atratividade (intensidade de preferência). Por outro lado, a informação MACBETH inclui os julgamentos semânticos inseridos no modelo, mas ignora qualquer escala de pontuação ou ponderação compatível com esses julgamentos. A informação cardinal denota uma escala numérica específica e validada pelo decisor. Além disso, ao analisar o efeito da informação cardinal sobre os resultados, o M-MACBETH permite que um grau de imprecisão seja associado a cada critério como uma margem em torno da pontuação de cada opção. Relativamente às secções, a informação local diz respeito a informação específica num determinado critério (mais detalhadamente, aos julgamentos efetuados nas alternativas em relação aos critérios), ao passo que a informação global diz respeito à informação de ponderação dos critérios, isto é, aos pesos associados aos critérios (Bana e Costa et al., 2017).

Na análise de robustez está implícita uma análise de dominância que pode ser classificada como: i) absoluta (▲) [também conhecida como “dominância clássica”, segundo Bana e Costa et al. (2003)], onde x domina y , no caso de o desempenho de x ser globalmente melhor (que y) e parcialmente melhor ou pelo menos igual (que/a y) em todos os critérios; ii) aditiva (+), no caso do desempenho de x ser globalmente melhor que y , mas não ser parcialmente melhor (que y) em pelo menos um critério.

Ainda relativamente à simbologia utilizada: i) o símbolo ▲ indica que a proposta em linha domina a proposta em coluna; ii) o símbolo + denota que a proposta em linha domina aditivamente a proposta em coluna; iii) o símbolo ? significa que a preferência da ação da linha sobre a ação da coluna pode ser modificada se houver menos (ou mais) que a incerteza definida nas alterações de peso, isto é, que as afirmações “ x é mais atrativa que y ” ou “ x é menos atrativa que y ” não são robustas.

Para ativar esta funcionalidade selecionou-se no menu “Opções – Análise de Robustez”, surgindo a janela ilustrada na Figura 5.39. Por defeito, ao abrir pela primeira vez a janela de análise de robustez, as conclusões são apresentadas considerando somente informação ordinal local e ordinal global. Neste caso, pode ver-se que apenas a informação ordinal é insuficiente para determinar qual a melhor proposta, ou seja, ordenar cada alternativa dentro de cada critério não chega para determinar se uma dessas propostas é globalmente melhor que qualquer uma das outras. Torna-se por isso necessário saber não só se uma proposta é melhor num critério, mas também quanto melhor ela é.

	[tudo sup.]	SR3	SR4	SR5	SR1	SR2	[tudo inf.]
[tudo sup.]	=	▲	?	?	▲	▲	▲
SR3		=	?	?	?	?	▲
SR4	?	?	=	?	?	?	?
SR5	?	?	?	=	?	?	?
SR1		?	?	?	=	?	?
SR2		?	?	?	?	=	?
[tudo inf.]			?	?	?	?	=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
C1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
	ordinal	MACBETH	cardinal
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%

Figura 5.39 – Análise de robustez (informação ordinal: local e global)

A contabilização da informação MACBETH é por isso essencial para determinar qual a melhor proposta. A Figura 5.40 ilustra a ativação da informação MACBETH local face à situação anterior. Constatase a troca de posições entre a SR1 e SR2, assim como que SR3 domina aditivamente SR1. No entanto, verifica-se que com esta informação é ainda impossível definir qual a melhor proposta.

	[tudo sup.]	SR3	SR4	SR5	SR2	SR1	[tudo inf.]
[tudo sup.]	=	▲	?	?	▲	▲	▲
SR3		=	?	?	?	+	▲
SR4	?	?	=	?	?	?	?
SR5	?	?	?	=	?	?	?
SR2		?	?	?	=	?	?
SR1			?	?	?	=	?
[tudo inf.]			?	?	?	?	=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
C1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%
C14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
	ordinal	MACBETH	cardinal
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%

Figura 5.40 – Análise de robustez (informação ordinal: local e global; e MACBETH local)

Com efeito, só quando se acrescenta a informação cardinal é que se torna possível alcançar um resultado final, como se pode observar na Figura 5.41. Previamente a uma observação mais profunda dos resultados obtidos, convém referir que o aspeto “Custo” não é contabilizado nesta análise. Numa primeira abordagem, verifica-se que a ordenação das alternativas corresponde à anteriormente obtida na Tabela de pontuações (Tabela 5.10). Conforme esperado, como nenhuma solução obteve uma pontuação global igual ou superior a 100, mas sim pontuações parciais iguais ou superiores a 100, [tudo sup.] domina aditivamente SR5 e SR4 e, o mesmo domina SR3, SR2 e SR1. Observa-se que nenhuma alternativa (considerando apenas as SR) domina outra de forma absoluta (▲), registando-se apenas situações de dominância aditiva (+). Tal sugere que apenas existem situações em que o desempenho da alternativa x é globalmente melhor que o da alternativa y, mas não é parcialmente melhor (que y) em todos os critérios. Neste sentido, constata-se que: i) SR5 domina aditivamente as quatro restantes alternativas; ii) SR4 domina aditivamente SR3, SR2 e SR1; iii) SR3 domina aditivamente SR2 e SR1; iv) SR2 domina aditivamente SR1.

Análise de robustez							
	[tudo sup.]	SR5	SR4	SR3	SR2	[tudo inf.]	SR1
[tudo sup.]	=	+	+	▲	▲	+	▲
SR5		=	+	+	+	+	+
SR4			=	+	+	+	+
SR3				=	+	▲	+
SR2					=	+	+
[tudo inf.]						=	+
SR1							=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
C1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
C14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global		
ordinal	MACBETH	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura 5.41 - Análise de robustez (informação ordinal e cardinal: local e global; e MACBETH local)

Importa salientar que, a análise de robustez obtida apresenta um *ranking* com as alternativas, estabelecendo uma ordem de dominância. No entanto, existem diversas situações de não dominância em que o *ranking* é sensível a pequenas mudanças de opinião do decisor.

Nesta perspetiva, realizaram-se várias alterações simultâneas (i.e. simulações) nos pesos dos critérios, de forma a extrair mais conclusões relativamente à robustez do modelo. A Figura 5.42 exemplifica uma das análises de robustez efetuada, mais concretamente o caso em que se associou uma oscilação de $\pm 5\%$ nos pesos dos critérios. Face ao caso anterior, observa-se pela Figura 5.42 que tudo se manteve inalterado, com exceção da ordenação entre as alternativas SR5 e

SR4 e a não existência de robustez suficiente para afirmar que uma dessas alternativas domina a outra. Salienta-se que, estas duas alternativas apresentaram pontuações globais bastante próximas mas face às restantes. Para valores de oscilação superiores (de informação global cardinal) ao apresentado, registou-se a mesma ordenação.

Análise de robustez							
	[tudo sup.]	SR4	SR5	SR3	SR2	[tudo inf.]	SR1
[tudo sup.]	=	+	+	+	+	+	+
SR4		=	?	+	+	+	+
SR5		?	=	+	+	+	+
SR3				=	+	+	+
SR2					=	?	+
[tudo inf.]					?	=	?
SR1						?	=

Informação local		
	ordinal	MACBETH
C1	✓	✓
C2	✓	✓
C3	✓	✓
C4	✓	✓
C5	✓	✓
C6	✓	✓
C7	✓	✓
C8	✓	✓
C9	✓	✓
C10	✓	✓
C11	✓	✓
C12	✓	✓
C13	✓	✓
C14	✓	✓

Informação global		
	ordinal	MACBETH
✓		✓

Figura 5.42 – Análise de robustez (oscilação de $\pm 5\%$ no peso dos critérios)

Na sequência das análises de robustez efetuadas, pode-se concluir que o modelo concebido neste estudo é robusto, dada a estabilidade demonstrada perante variações simultâneas nos coeficientes de ponderação dos critérios. Só com uma oscilação de $\pm 5\%$ no peso dos critérios é que se registou uma alteração entre duas alternativas (SR4 e SR5), o que veio reforçar os possíveis benefícios que se podem adquirir com a implementação da SR4, isto sem contabilizar a relação custo-benefício. Por outro lado, e tendo em conta os resultados obtidos, é possível concluir que, para cumprir os objetivos de reabilitação estudados, não são suficientes intervenções de pequena dimensão (SR1 e SR2) para beneficiar o sistema, mas apenas uma intervenção com uma dimensão significativa poderá, efetivamente, modificar o desempenho global do sistema. Em todo o caso, as análises desenvolvidas trouxeram segurança aos especialistas, reforçando a sua convicção nos juízos projetados.

5.5. Considerações finais

Este capítulo teve início com uma breve descrição das etapas envolvidas no processo de reabilitação de infraestruturas ferroviárias, pois de acordo com o analisado no capítulo anterior, a existência de um plano de monitorização e respetivas campanhas de inspeção à via-férrea são determinantes para o decorrer do processo de gestão da manutenção da via.

Em seguida foi efetuada uma etapa de análise dos dados de inspeção de via que, quando comparados com as normas em vigor, permitem avaliar os danos existentes e, assim determinar a condição da infraestrutura. Relativamente ao estado de degradação presente no trecho de via-férrea considerado, salienta-se sobretudo que a ausência da CSB (ou de qualquer outra com o mesmo fim) representa um processo de degradação mais acelerado, visto que, não são cumpridas as funções apresentadas no Capítulo 2. Ao anteriormente exposto está associado um aumento de custos relativamente à intervenção na via. Neste sentido, propôs-se um conjunto de medidas de reabilitação adequadas a essa mesma condição.

Seguiu-se a aplicação de uma metodologia multicritério de apoio à decisão, cuja utilização se considera uma mais valia na resolução de problemas complexos. Este tipo de metodologia assenta em dois princípios fundamentais (Princípio da inter-relação e inseparabilidade entre os elementos objetivos e subjetivos do contexto de decisão e Princípio do construtivismo e da aprendizagem) e desenvolve-se em três fases (Estruturação, Avaliação e Elaboração de Recomendações) em constante reapreciação, num processo cíclico e dinâmico, construtivo, interativo, recursivo e de aprendizagem, onde cada passo dado pode significar a necessidade de recuar e rever os passos anteriormente definidos caso surjam novos elementos a considerar.

A fase de estruturação assume um papel fundamental no desenvolvimento do modelo de avaliação, uma vez que se baseia na caracterização de todo o problema de decisão. Nesta lógica, foi definida uma questão inicial: *“Qual das seguintes soluções de reabilitação apresenta uma melhor relação custo-benefício?”*, a qual permitiu iniciar a estruturação do problema, assim como o encaminhamento da discussão. Para o efeito, foi necessário reunir um grupo de especialistas dispostos a colaborar. Seguiu-se o próximo ponto (i.e. definição da árvore de valor), o qual se focou na materialização de uma estrutura arborescente de critérios. Neste ponto, o grupo de especialistas teve como objetivo a definição, interpretação e operacionalização dos objetivos, critérios e respetivos níveis de desempenho que compõem a árvore de valor. Simultaneamente, elaborou-se uma adequada descrição para cada um dos critérios definidos. No entanto, este processo foi, apesar de enriquecedor, bastante oneroso, devido ao tempo e disponibilidade exigido a todos os intervenientes. Neste contexto, a colaboração do painel de especialistas foi essencial, garantindo que a árvore de valor final fosse consistente, funcional e realista.

Concluída a fase de estruturação, reuniram-se as condições necessárias para a dar início à fase de avaliação, a qual se prende com a aplicação da metodologia MACBETH concomitantemente com o auxílio da metodologia proposta (inquérito) para posterior cálculo de escalas cardinais de valor. A este propósito, foi necessário realizar e fornecer ao grupo de especialistas as instruções para o inquérito e o próprio inquérito. Nesta sequência, convém referir a importância das discussões estabelecidas com os especialistas, no sentido de validar as respetivas escalas, aumentar o conhecimento sobre cada um dos critérios, assim como de todo o problema de decisão em si.

Nesta etapa tornou-se necessário contabilizar que numa abordagem multicritério de apoio à decisão está sempre envolvida uma vasta subjetividade e, portanto, não existe apenas um só percurso possível e/ou correto. Habitualmente o processo de apoio à decisão mediante a meto-

dologia MACBETH envolve a realização de conferências de decisão, desde a identificação do problema até se estabeleceram as funções de valor para cada critério e respetivos pesos.

A metodologia proposta procurou, mediante inquéritos individuais, obter as opiniões dos especialistas que correspondessem à sua real convicção, isto é, sem estes serem alvo da influência de um outro especialista mais defensor das suas ideias, algo bastante suscetível de acontecer em conferências de decisão. Assim, após a identificação do problema e das alternativas, assim como da definição da árvore de valor e classificação das alternativas, procedeu-se à realização de inquéritos individuais ao invés de conferências de decisão.

Realizados os inquéritos e após o tratamento de dados fundamentado pela opinião individual dos especialistas, tornou-se possível estabelecer as funções de valor para cada critério e respetivos pesos. Salienta-se que, na metodologia proposta procurou-se adaptar o inquérito ao processo de pergunta-resposta que normalmente decorre nas conferências de decisão.

Segundo Ferreira et al. (2012), uma das principais dificuldades da abordagem multicritério de apoio à decisão reside na complexidade de reunir toda a equipa de especialistas ao mesmo tempo e num dado local. Isto deve-se maioritariamente à disponibilidade limitada por parte dos diretores de topo (geralmente especialistas) para participar em conferências de decisão (ou sessões de grupo). Assim, um outro aspeto que despoletou a metodologia proposta foi a inexistência de uma alternativa quando não fosse possível reunir todos os intervenientes num mesmo local e hora, atendendo à inconciliabilidade de disponibilidades e à crescente globalização e internacionalização existente nas diversas entidades. A metodologia proposta surge como forma de ultrapassar esta dificuldade. Tal é fortemente sustentado pelo facto de no final do processo, ter sido manifestamente evidente a satisfação dos especialistas face aos resultados obtidos.

Posto isto, e por forma a simplificar ao máximo a metodologia, estudou-se previamente o processo e as necessidades associadas à elaboração de um modelo no MACBETH, isto é, a compatibilidade existente entre os requisitos necessários à realização do modelo de análise multicritério MACBETH e os resultados finais decorrentes do tratamento e análise de resultados dos inquéritos. Nestas condições, conseguiu-se elaborar um inquérito mais sintetizado e de fácil preenchimento.

As funções de valor para cada critério e respetivos pesos obtidos e contabilizados na posterior análise revelaram conformidade com a conjugação das opiniões dos especialistas. Realce-se que, a interação com os especialistas mostrou-se essencial desde a definição dos objetivos e critérios, assim como na definição do problema e nos julgamentos das diferenças de atratividade.

Logo depois, deu-se continuidade ao processo de apoio à decisão, apresentando-se a forma como decorreram as fases de avaliação e de recomendações. Depois da análise e tratamento de dados e alcançada a matriz MACBETH, assim como a ordenação dos critérios, o grupo concentrou a sua atenção na análise da escala métrica obtida, que permitiu aos especialistas visualizar, em pormenor, as pontuações atribuídas a cada nível de impacto, bem como a diferença entre eles. O mesmo se aplicou aos pesos obtidos. Atendendo aos diferentes troços da escala, o

facilitador questionou o grupo, uma vez mais, se concordavam com os valores e distâncias obtidas, tendo a resposta sido afirmativa.

Após a obtenção e análise dos resultados fornecidos pelo M-MACBETH, elaboraram-se análises de sensibilidade e robustez de forma a verificar a consistência e robustez do modelo. Com efeito, foi possível verificar que os valores das SR poderiam variar dentro de intervalos significativos, sem influenciar o resultado final. Perante as análises efetuadas, foi possível afirmar que o modelo concebido é válido e robusto, dada a estabilidade existente face às variações dos coeficientes de ponderação. Todavia, sabendo que as análises efetuadas são contextualizadas, qualquer generalização dos resultados é fortemente desencorajada sem as devidas adaptações.

6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O presente e último capítulo destina-se a apresentar as principais conclusões fruto dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, as vantagens e limitações da abordagem multicritério de apoio à decisão empregue e metodologia proposta, assim como algumas recomendações. Por último, apresentam-se algumas sugestões alusivas a possíveis desenvolvimentos e investigações futuras com base no trabalho até aqui desenvolvido.

6.1. Conclusões

O presente trabalho foi potenciado pela necessidade de um sistema eficiente de apoio à decisão para auxiliar os decisores de obras de reabilitação ferroviária a minimizar os custos do ciclo de vida, enquanto maximizam os benefícios do trabalho.

A partir dos métodos disponíveis, o MACBETH e a sua implementação no *software* M-MACBETH foram escolhidos com base nas suas características. Esta metodologia inclui bases teóricas sólidas, permite o estabelecimento de pesos de critérios e funções de valor a partir de julgamentos resultantes de comparação binária (par-a-par), sendo também compatível com a metodologia proposta.

De seguida, após a introdução de dados no *software* M-MACBETH, o mesmo devolveu resultados. Com base na ordenação de critérios e na pontuação parcial das alternativas em cada critério, tornou-se possível obter a pontuação global de cada alternativa no M-MACBETH, isto é, ao modelo de decisão foi aplicado o operador de agregação M-MACBETH, que permitiu racionalizar, sintetizar e estruturar o problema de forma a desenvolver uma recomendação final. A pontuação obtida é o resultado de um processo que permite considerar os benefícios da realização de uma dada intervenção de reabilitação na infraestrutura ferroviária em estudo e para a condição atual da mesma.

Dos resultados obtidos observa-se que da primeira à última alternativa houve, simultaneamente, um aumento da pontuação global e custo. SR4 e SR5 destacam-se pelos seus elevados desempenhos globais e proximidade. A SR3 apresenta uma diferença considerável de desempenho face às duas últimas, mas também de custo. Com base no cálculo da relação Benefício/Custo realizado, numa primeira abordagem, e relativamente às alternativas SR1 e SR2, confirma-se

que estas não são alternativas viáveis ao problema em mãos, tendo em conta o perfil dos especialistas e o estado da infraestrutura ferroviária. Por outro lado, a relação B/C da SR5 realça que a diferença de desempenho face à diferença de custo das duas anteriores (SR3 e SR4) não é compensatória. Por último, SR3 e SR4 apresentam as melhores relações custo-benefício, diferindo muito pouco entre si. Assim, pode-se afirmar que um melhor proveito associado a um menor custo pode ser conseguido mediante uma destas duas soluções de reabilitação.

As análises de sensibilidade e robustez efetuadas demonstraram que a ordenação obtida dificilmente pode sofrer alterações entre as alternativas em comparação. Ainda assim, vale a pena ressaltar que nenhuma alternativa obteve uma pontuação global igual ou superior a 100, o que significa que o grau de exigência é elevado e que não existem soluções de reabilitação de excelência face ao conjunto de critérios considerados no problema e às opiniões dos especialistas.

Com base na conciliação conseguida entre os resultados finais obtidos e os que eram esperados, demonstrou-se que a metodologia proposta é uma possível via alternativa à “tradicionalmente” utilizada. Mais, com a presente metodologia conseguiu-se colocar objetividade em algo subjetivo, isto é, obter uma ordenação das alternativas (SR) com base em quatro perfis distintos. Assim, o modelo desenvolvido permitiu que se alcançassem os objetivos pretendidos, revelando ser um procedimento francamente útil e um grande auxílio numa tomada de decisão mais fundamentada técnica e economicamente, ao permitir ter uma visão global a longo prazo.

Relativamente ao processo de pergunta-resposta segundo a metodologia proposta (via inquérito) pensa-se que a primeira questão resultou num processo bastante simplificado para o inquirido que, apesar de uma análise e tratamento de dados ligeiramente exaustiva devida à variabilidade de opiniões, originou um resultado final superior ao expectável. Prova disso, foi a inexistência de inconsistências aquando da introdução de julgamentos MACBETH de diferença de atratividade entre níveis de performance para os 14 critérios. Por outro lado, a questão 3 resultou numa análise e tratamento de dados exaustiva, consequência de se ter pretendido facilitar em demasia o inquirido com uma pergunta de fácil resposta. Pensa-se que se poderia ter apresentado, de forma quase idêntica à questão 1, uma matriz que relacionasse todos os critérios, por forma a que o inquirido os ordenasse e posteriormente classificasse o nível de atratividade entre critérios. Desta forma, a análise e tratamento de dados seria semelhante ao processo preconizado na questão 1, mas por outro lado quanto maior a divergência de opiniões, mais complexa se tornaria a análise e tratamento de dados. No entanto, considera-se que com esta questão também se obteve um resultado final bastante satisfatório, visto que os especialistas responderam positivamente quando questionados sobre a ordenação (pesos) de critérios obtida pelo facilitador.

Considerando o apresentado nesta dissertação sugere-se que a metodologia MACBETH seja utilizada sinergicamente com a reabilitação de infraestruturas ferroviárias ao longo do seu ciclo de vida, ao possibilitar o envolvimento de um método mais completo na contabilização dos inúmeros fatores que intervêm neste campo.

Em suma, destaque-se a importância da abordagem proposta pelo MACBETH que, conforme observado, permite de uma maneira clara estabelecer formas de medição da atratividade de impactos e atribuir pesos aos diferentes objetivos, o que é essencial num processo desta natureza, onde se pretende avaliar globalmente um conjunto de ações, levando em conta que os objetivos podem não ter todos a mesma relevância.

De seguida, apresentam-se algumas das vantagens identificadas. O MACBETH é uma abordagem muito simples, com forte suporte de *software*, não requer longos cálculos matemáticos e também possui um tempo computacional mínimo quando comparado a outros métodos de tomada de decisão.

É importante ressaltar que as discussões sobre os diversos pontos de vista resultaram num acréscimo significativo de conhecimento, propiciando uma compreensão global do problema por parte dos intervenientes. Não obstante, o *software* M-MACBETH fornece uma ferramenta de verificação de consistência e, se os julgamentos forem inconsistentes, sugere possíveis alterações para torná-los consistentes. Assim, pode-se afirmar que a utilização exhaustiva do *software* M-MACBETH gerou confiança no modelo construído.

Um outro aspeto reside no excesso de informações a processar que pode, por vezes, conduzir a decisões pouco sustentadas considerando-se somente um ou dois únicos critérios de avaliação do desempenho do sistema. Por outro lado, a multiplicidade de critérios pode dificultar a análise, pelo que o uso da decisão multicritério na reabilitação de infraestruturas ferroviárias, integrando todos os pontos de vista relevantes para a tomada de decisões, se torna cada vez mais relevante.

Ao longo do processo, foram identificadas algumas limitações, como em qualquer modelo de avaliação, inerentes à aplicação das metodologias utilizadas (*i.e.* metodologia proposta e MACBETH). Uma das principais dificuldades da ACB refere-se à definição precisa de benefícios e custos, dada a variabilidade de critérios. Assim, uma limitação do modelo construído reside na possibilidade de não estarem incorporados todos os demais objetivos e critérios.

Como referido anteriormente, uma das dificuldades está relacionada com o facto de ser necessária uma grande disponibilidade de tempo por parte dos especialistas, aspeto esse que foi fulcral no despertar e motivar para o desenvolvimento da metodologia proposta.

O facto de o modelo ser construído apenas com base nas opiniões e experiências dos especialistas, pode também indiciar uma limitação, pois os resultados ficam muito dependentes do contexto e das especificidades do grupo.

Outro aspeto prende-se com o pequeno número de especialistas envolvidos neste processo, mais concretamente um por área de representação. Neste sentido, e para um caso real, recomenda-se o envolvimento de um maior número de especialistas.

Relativamente ao processo de participação dos especialistas, estes apresentaram um conjunto de dificuldades, nomeadamente na identificação dos critérios com base nas suas ideias e na hierar-

quização dos mesmos. Além disso, e durante a aplicação da metodologia MACBETH, foram identificadas dificuldades de outra natureza, nomeadamente: i) na elaboração da descrição de cada critério, devido às ideias e/ou opiniões divergentes que foram surgindo; ii) e, na definição e/ou identificação dos níveis de referência bom e neutro, dadas as experiências de cada especialista.

Em termos de recomendações, apesar das inúmeras análises de sensibilidade e de robustez efetuadas, importa ter presente que o sistema desenvolvido neste trabalho assume características idiossincráticas. Sustentando esta ideia, é importante ter em atenção que eventuais generalizações e extrapolações deverão ser devidamente ponderadas. Como tal, projeta-se a necessidade de se testar o modelo concebido noutros contextos, bem como comparar os resultados alcançados com os resultados obtidos por aplicação de outras metodologias multicritério.

No âmbito desta dissertação, foi também submetido um resumo e artigo para publicação (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201821112007>), posteriormente apresentado no congresso internacional VETOMAC XIV (2018) - *14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery*, intitulado “*Multi-criteria analysis applied to railway rehabilitation*” e submetido um resumo para o Encontro Nacional de Betão Estrutural 2018 (BE2018), intitulado “Análise multicritério aplicada na reabilitação ferroviária”. No **Anexo VI** e **VII** apresenta-se a primeira página dos resumos publicado, respetivamente.

6.2. Desenvolvimentos futuros

É de senso comum que a implementação destas metodologias inovadoras pode encontrar alguma resistência no seio de uma organização. Alguns métodos e modos de atuar encontram-se de tal forma enraizados na cultura da empresa que, se torna difícil encontrar espaço para novas ideias e ferramentas, mesmo que estas possam melhorar os seus próprios processos. Não será descabido afirmar que uma das maiores tarefas a realizar será a transformação de consciências. Por conseguinte, as empresas deverão alargar os seus horizontes e permitir a utilização deste tipo de ferramentas.

O processo de “otimização de conhecimento” está a evoluir rapidamente, o importante agora será não perder esse “comboio”. Nesta sequência de ideias, seria possível prever com maior rigor as necessidades orçamentais para a reabilitação de infraestruturas ferroviárias com um nível de desempenho adequado.

Após a tomada de decisão e escolha de uma das soluções de reabilitação mais eficientes, seria conveniente poder realizar uma nova análise que verificasse a integridade da decisão tomada. Em caso afirmativo, pretende-se que a metodologia proposta possa vir a ser aplicada noutras infraestruturas ferroviárias, tanto nacionais como internacionais e, assim, contribuir para uma reabilitação mais sustentável, tanto em termos económicos como ambientais. No entanto, seria interessante recorrer a outras técnicas multicritério, como por exemplo a AHP, para uma

revisão categorizada da aplicação de técnicas multicritério, bem como a comparação dos resultados obtidos em diferentes aplicações.

Sugerem-se como desenvolvimentos futuros próximos: i) a aplicação desta metodologia a casos de decisão reais, como por exemplo, considerar um trecho de via-férrea com uma condição idêntica à do presente caso de estudo, por forma a ser possível comparar a ordenação de soluções obtida; ii) a integração de um sistema de apoio à decisão (por exemplo, a metodologia MACBETH) nas entidades gestoras da RFN por forma a validar a utilidade da presente metodologia; iii) a incorporação de análises de sensibilidade no peso e de robustez aos modelos realizados (aspeto já integrado na metodologia MACBETH); iv) e, a extrapolação do problema de orçamento limitado ao problema de recursos limitados.

Em termos da investigação futura, dando continuidade ao trabalho desenvolvido, esta deve focar-se em: i) incorporar na análise os diferentes intervalos de tempo e verificar se a ordenação sofre alterações; ii) modelar a análise de custo-benefício, incluindo o estado de degradação ajustado à evolução da condição estrutural da infraestrutura, assim como os custos de intervenção associados para a evolução das diferentes unidades de análise de decisão. Desta forma, seria possível determinar o momento correspondente a uma reabilitação mais eficiente, isto é, aquela que acarreta um maior número de benefícios associado a um menor custo.

Referência Bibliográfica

- Aguiar, J., Cabrita, A., Appleton, J., 2002. Guião de Apoio à Reabilitação de Habitação. LNEC.
- Ambrasaitė, I., Barfod, M.B., Salling, K.B., 2011. MCDA and risk analysis in transport infrastructure appraisals: The Rail Baltica case. *Procedia-Soc. Behav. Sci.* 20, 944–953.
- An, M., Chen, Y., Baker, C.J., 2011. A fuzzy reasoning and fuzzy-analytical hierarchy process based approach to the process of railway risk information: A railway risk management system. *Inf. Sci.* 181, 3946–3966.
- Aydin, N., 2017. A fuzzy-based multi-dimensional and multi-period service quality evaluation outline for rail transit systems. *Transp. Policy* 55, 87–98.
- Baldeiras, M., 2008. Monitorização da Infra-estrutura Ferroviária. Curso Form. Em Eng. Ferrov. Módulo 4.
- Bana e Costa, C., Angulo-Meza, L., Oliveira, M., 2013. O método MACBETH e aplicação no Brasil. *ENGEVISTA* 15.
- Bana e Costa, C., Beinat, E., 2010. Estruturação de modelos de análise multicritério de problemas de decisão pública. *Lisb. Cent. Estud. Gest. Inst. Super. Téc.*
- Bana e Costa, C., De Corte, J.-M., Vansnick, J.-C., 2003. MACBETH. (Overview of MACBETH multicriteria decision analysis approach).
- Bana e Costa, C.A., De Corte, J.-M., Vansnick, J.-C., 2017. M-MACBETH Versão 2.5.0, Guia do utilizador.
- Bana e Costa, C.A., De Corte, J.-M., Vansnick, J.-C., 2012. MACBETH. *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.* 11, 359–387. <https://doi.org/10.1142/S0219622012400068>
- Bana e Costa, C.A., de Corte, J.-M., Vansnick, J.-C., Cochran, J.J., Cox, L.A., Keskinocak, P., Kharoufeh, J.P., Smith, J.C., 2010. MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), in: *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0970>
- Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.-C., 2008. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. *Eur. J. Oper. Res.* 187, 1422–1428. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.022>
- Berggren, E., 2009. Railway track stiffness: dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance (PhD).

- Bouwman, M.E., Moll, H.C., 2002. Environmental analyses of land transportation systems in The Netherlands. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 7, 331–345. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(02\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(02)00002-0)
- Brans, J., 1982. L'ingenierie de la decision, l'elaboration d'instruments d'aide a la decision. Colloque sur l'Aide a la Decision. Fac. Sci. L'Administration Univ. Laval.
- Bureika, G., Liudvinavičius, L., Vaičiūnas, G., Bekintis, G., 2013. Applying analytic hierarchy process to assess traffic safety risk of railway infrastructure. *Ekspluat. Niezawodn.* 15.
- Caetano, V., Couto, P., Fontul, S., J. F. Silva, M., 2018. Multi-criteria analysis applied to railway rehabilitation. *MATEC Web Conf.* 211, 12007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821112007>
- Čaiko, J., Kuņicina, N., Patlins, A., Pelņiķis, A., Ribickis, L., 2008. Development of decision-making procedure of choice of the equipment for railway crossing at stations. *Publ. Ed.* 151–154.
- Celik, E., Aydin, N., Gumus, A.T., 2014. A multiattribute customer satisfaction evaluation approach for rail transit network: A real case study for Istanbul, Turkey. *Transp. Policy* 36, 283–293.
- CEN Brussels, 2010. EN 13848-5: Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels.
- Cerdeiral, J.C.F., 2014. Influência da subestrutura na evolução da degradação da qualidade geométrica da via-férrea (MSc). FEUP.
- Chen, S., Leng, Y., Mao, B., Liu, S., 2014. Integrated weight-based multi-criteria evaluation on transfer in large transport terminals: A case study of the Beijing South Railway Station. *Transp. Res. Part Policy Pract.* 66, 13–26.
- Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013a. A Avaliação do Desenvolvimento Socioeconómico - EVALSED, MANUAL TÉCNICO II: Métodos e Técnicas. Instrumentos de Enquadramento das Conclusões da Avaliação: Análise Custo-Benefício.
- Comissão Europeia e Observatório QREN, 2013b. A Avaliação do Desenvolvimento Socioeconómico - EVALSED, MANUAL TÉCNICO II: Métodos e Técnicas. Instrumentos de Enquadramento das Conclusões da Avaliação: Análise Multicritério.
- Costa, C.A.B. e, Vansnick, J.-C., 1995. General Overview of the Macbeth Approach, in: *Advances in Multicriteria Analysis, Nonconvex Optimization and Its Applications*. Springer, Boston, MA, pp. 93–100. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2383-0_6
- da Silva Ferreira, J.N.V., 2013. Long-Term Behaviour of Railway Transitions under Dynamic Loading Application to Soft Soil Sites.
- Dahlberg, T., 2003. Railway track settlements-a literature review. Rep. EU Proj. SUPER-TRACK Div. Solid Mech. IKP Linköping Univ. Linköping Swed.
- Dantas, R., 2014. Modelo de Gestão de Ativos da via-férrea baseado em análise probabilística de Custos por Ciclo de Vida (MSc). IST-UTL.
- De Brucker, K., 1998. Sociaal-economische evaluatie van overheidsinvesteringen in transportinfrastructuur: kritische analyse van het bestaande instrumentarium Ontwikkeling van een eclectisch evaluatie-instrument. Garant.
- De Luca, M., Dell'Acqua, G., Lamberti, R., 2012. High-speed rail track design using GIS and multi-criteria analysis. *Procedia-Soc. Behav. Sci.* 54, 608–617.

- Dhir, S., Marinov, M.V., Worsley, D., 2015. Application of the analytic hierarchy process to identify the most suitable manufacturer of rail vehicles for High Speed 2. *Case Stud. Transp. Policy* 3, 431–448.
- Direção Geral de Política Regional da Comissão Europeia, 2003. Manual de análise de custos e benefícios dos projetos de investimento.
- Dodgson, J.S., Spackman, M., Pearman, A., Phillips, L.D., 2009. Multi-criteria analysis: a manual. Dep. Communities Local Gov. Lond.
- Dooms, M., Macharis, C., 2006. Multi-Actor, Multi-Criteria Analysis of the DHL-project. *Institutional Asp. Transp. Proj. Eval.*
- Eboli, L., Mazzulla, G., 2013. A multicriteria approach for analyzing railway service quality.
- ERRI, D., 1999. 214/RP 9. Rail Bridg. Speeds 200 Km/h Final Rep.
- Esveld, C., 2001. Modern railway track, 2. ed. ed. MRT-Productions, Zaltbommel.
- Esveld Official Website [WWW Document], n.d. URL <http://www.esveld.com/index.html> (consultado a 09/03/2018).
- Falcão Silva, M.J., Salvado, F., 2015. Análise custo-benefício-Metodologia para apoio à decisão em intervenções de arquitetura, engenharia e construção. LNEC.
- Fernandes, F.M.C.P., Lourenço, P.B., 2007. Aplicações do georadar na reabilitação e deteção de anomalias.
- Fernave, 2003. Fernave. Manual de Via.
- Ferreira, F.A.F., Spahr, R.W., Santos, S.P., Rodrigues, P.M.M., 2012. A multiple criteria framework to evaluate bank branch potential attractiveness. *Int. J. Strateg. Prop. Manag.* 16, 254–276. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2012.707629>
- Filippo, S., Ribeiro, P.C.M., Ribeiro, S.K., 2007. A Fuzzy Multi-Criteria Model applied to the management of the environmental restoration of paved highways. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 12, 423–436.
- Fontul, S., 2017. Slides das aulas da disciplina Infraestruturas ferroviárias e portuárias.
- Fontul, S., 2004. Structural Evaluation of Flexible Pavements using Non Destructive Tests (PhD).
- Fontul, S., Fortunato, E., De Chiara, F., Burrinha, R., Baldeiras, M., 2016. Railways track characterization using ground penetrating radar. *Procedia Eng.* 143, 1193–1200.
- Fontul, S., Fortunato, E., Paixão, A., De Chiara, F., 2012. Non Destructive Tests for Evaluation of Railway Platforms: Application of Ground Penetrating Radar. Presented at the the First International Conference on Railways Technology: Research, Development and Maintenance, pp. 18–20.
- Fortunato, E., Paixão, A., Calçada, R., Clemente, J.C., 2016. Comportamento Estrutural de Zonas de Transição em Vias-Férreas-Análise de um Caso de Estudo.
- Fortunato, E.M.C., 2005. Renovação de plataformas ferroviárias: estudos relativos à capacidade de carga (PhD). FEUP.
- Geosin Geosynthetics [WWW Document], n.d. . Geosin Geosynth. URL <http://www.geosin.pt/geosynthetics/aplicacoes/infraestruturas/> (consultado a 04/09/2018).
- Gerçek, H., Karpak, B., Kılınçaslan, T., 2004. A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transit networks in Istanbul. *Transportation* 31, 203–228.

- Goossens, H., 2010. Maintenance of high speed lines. Rep. UIC Paris.
- Guo, K.L., 2008. DECIDE: a decision-making model for more effective decision making by health care managers. *Health Care Manag.* 27, 118–127. <https://doi.org/10.1097/01.HCM.0000285046.27290.90>
- Harrison, E.F., 1987. The managerial decision-making process, 3rd ed. ed. Boston : Houghton Mifflin Co.
- Hess, J., 2008. Rail Expansion Joints-The Underestimated Track Work Material? Presented at the Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways: Selected and revised papers from the Workshop on Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways, Porto, Portugal, 15–16 October, 2007, CRC Press, p. 149.
- Infraestruturas de Portugal, 2018a. Léxico - Infraestruturas de Portugal [WWW Document]. Léxico - Infraestruturas Port. URL <https://infraestruturasdeportugal.pt/negocios-e-servicos/lexico> (consultado a 12/04/2018).
- Infraestruturas de Portugal, 2018b. Infraestruturas de Portugal [WWW Document]. Infraestruturas Port. URL <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/> (consultado a 10/05/2018).
- Instituto da Mobilidade e dos Transporte Terrestres, IP, 2009. Instrução de exploração técnica N° 77: Normas e Procedimentos de Segurança em Trabalhos na Infra-estrutura Ferroviária. IET 77.
- Ishida, M., Moto, T., Kono, A., Jin, Y., 1999. Influence of loose sleeper on track dynamics and bending fatigue of rail welds. *Q. Rep. RTRI* 40, 80–85.
- Ishizaka, A., Nemery, P., 2013. Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9781118644898>
- Janssen, R., 2001. On the use of multi-criteria analysis in environmental impact assessment in The Netherlands. *J. Multi-Criteria Decis. Anal.* 10, 101–109.
- Jiang, P., Wang, D., Xing, Y., 2015. Risk Analysis of General Accidents in China Railway Passenger Transportation. Presented at the Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2015 Seventh International Conference on, IEEE, pp. 950–953.
- Kabir, G., Sadiq, R., Tesfamariam, S., 2014. A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Struct. Infrastruct. Eng.* 10, 1176–1210. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.795978>
- Karande, P., Chakraborty, S., 2014. A facility layout selection model using MACBETH method. Presented at the Bali, Indonesia: Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (January 7-9).
- Kosijer, M., Ivic, M., Markovic, M., Belosevic, I., 2012. Multicriteria decision-making in railway route planning and design. *Gradevinar* 64, 195–205.
- Lee, F., 2009. Veículo de Inspeção de Trilhos de Trem de Alta Velocidade, Baseado em Ultrassom e Correntes Parasitas. 10ª COTEQ Salvador Baía Bras.
- Li, Y.-H., 2009. Design scheme selection of railway freight car using a fuzzy analytic hierarchy process. Presented at the Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009. FSKD'09. Sixth International Conference on, IEEE, pp. 267–271.
- Longo, G., Medeossi, G., Padoano, E., 2012. Using simulation to assess infrastructure performance in multicriteria evaluation of railway projects. Presented at the Proceedings of the International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA.

- LOOTSMA, F.A., n.d. The french and the american school in multi-criteria decision analysis. *Opérations Res.* 24.
- Lopes, A., 2013. Avaliação da degradação de vias férreas: Caracterização do balastro com recurso ao Radar de Prospeção (MSc). UNL-FCT.
- Lundqvist, A., Dahlberg, T., 2005. Load impact on railway track due to unsupported sleepers. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit* 219, 67–77.
- Lundqvist, A., Larsson, R., Dahlberg, T., 2006. Influence of railway track stiffness variations on wheel/rail contact force. *Track High-Speed Railw. Porto Port.*
- Macharis, C., 2000. Strategische modellering voor intermodale terminals: Socio-economische evaluatie van de locatie van binnenvaart/weg terminals in Vlaanderen.
- Macharis, C., de Witte, A., Ampe, J., 2009. The multi-actor, multi-criteria analysis methodology (MAMCA) for the evaluation of transport projects: Theory and practice. *J. Adv. Transp.* 43, 183–202. <https://doi.org/10.1002/atr.5670430206>
- Macharis, C., Verbeke, A., De Brucker, K., 2004. The strategic evaluation of new technologies through multicriteria analysis: the ADVISORS case. *Res. Transp. Econ.* 8, 443–462.
- Markovic, L., Marković, D., Ćirović, G., 2012. APPLICATION OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION IN DESIGNING RAILWAY LINE AT THE LEVEL OF THE MAIN PROJECT.
- Marques, A., 2017. Avaliação da contaminação do balastro ferroviário: Contribuições na aplicação do Radar de Prospeção (MSc). UNL-FCT.
- Maskeliūnaite, L., Sivilevicius, H., 2011. Applying AHP technique to the assessment of railway trip quality (RTQ). Presented at the 8th International Conference "Environmental Engineering.
- Maskeliūnaite, L., Sivilevičius, H., Podvezko, V., 2009. Research on the quality of passenger transportation by railway. *Transport* 24, 100–112.
- Mateus, R., Ferreira, J.A., Carreira, J., 2008. Multicriteria decision analysis (MCDA): Central Porto high-speed railway station. *Eur. J. Oper. Res.* 187, 1–18.
- Moazami, D., Behbahani, H., Muniandy, R., 2011. Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic. *Expert Syst. Appl.* 38, 12869–12879.
- Montesinos-Valera, J., Aragonés-Beltrán, P., Pastor-Ferrando, J.-P., 2017. Selection of maintenance, renewal and improvement projects in rail lines using the analytic network process. *Struct. Infrastruct. Eng.* 13, 1476–1496.
- Nathanail, E., 2008. Measuring the quality of service for passengers on the hellenic railways. *Transp. Res. Part Policy Pract.* 42, 48–66. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.06.006>
- Nedevska, I.Z., Krakutovski, Z.M., Zafirovski, Z.S., 2017. Application of different methods of multicriteria analysis for railway route selection. *Tehnika* 72, 797–805.
- NP EN 13450, 2005. Agregados para balastro de via férrea.
- Nyström, B., Söderholm, P., 2010. Selection of maintenance actions using the analytic hierarchy process (AHP): decision-making in railway infrastructure. *Struct. Infrastruct. Eng.* 6, 467–479. <https://doi.org/10.1080/15732470801990209>
- Paixão, A., 2014. Transition zones in railway tracks (PhD). FEUP.
- Paixão, A., Fortunato, E., 2018. Aspetos do comportamento da via-férrea em zonas com singularidades e defeitos de geometria. *Semin. Patol. Em Infraestruturas Transp.*

- Paixão, A., Fortunato, E., Calçada, R., 2015. Design and construction of backfills for railway track transition zones. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit* 229, 58–70.
- Paixão, A., Fortunato, E., Calçada, R., 2014. Transition zones in railway tracks: An experimental and numerical study on the structural behaviour.
- Phillips, L.D., 2007. Decision Conferencing, in: Edwards, W., Miles, R.F.J., von Winterfeldt, D. (Eds.), *Advances in Decision Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 375–399. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511611308.020>
- Plasser American Website, 2018. Plasser American [WWW Document]. URL <http://www.plasseramerican.com/en/home/index.html> (consultado a 05/01/2018).
- Polat, G., Eray, E., 2015. An integrated approach using AHP-ER to supplier selection in railway projects. *Procedia Eng.* 123, 415–422.
- Read, D., Li, D., 2006. Design of track transitions. *TCRP Res. Results Dig.*
- REFER, EP, 2009. IT.VIA.018, Tolerâncias dos Parâmetros Geométricos da Via. Tolerâncias dos Parâmetros Geométricos da Via. Rede Ferroviária Nacional–REFER, EP.
- REFER, EP, 2008. IT.GEO.001, Fornecimento de Balastro e Gravelha.
- REFER, EP, 2007. IT.GEO.006, Características Técnicas do sub-balastro.
- REFER, EP, 2001. VIV02 (EM 120) - Veículo de inspeção de via. Descrição dos sistemas de medição. VIV02 (EM 120). Descrição dos sistemas de medição. Rede Ferroviária Nacional–REFER, EP.
- Ribeiro, A.C.C.A., 2012. Transições aterro-estrutura em linhas ferroviárias de alta velocidade: análise experimental e numérica (PhD). FEUP.
- Rietkötter, L.F.B., 2014. Ending the war in multi-criteria decision analysis: Taking the best from two worlds: the development and evaluation of guidelines for the use of MACBETH in multi-criteria group decision making for the assessment of new medical products.
- Rodrigues, D.D., Capitão, S., Fontul, S., 2013. Casos Práticos de Manutenção de Vias-Férreas em Portugal.
- Rogers, M., Bruen, M., Maystre, L.-Y., 2000. ELECTRE and Decision Support. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5057-7>
- Rosenhead, J., 1996. What's the Problem? An Introduction to Problem Structuring Methods. *Interfaces* 26, 117–131. <https://doi.org/10.1287/inte.26.6.117>
- Roy, B., 2005. Paradigms and Challenges, in: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, International Series in Operations Research & Management Science. Springer, New York, NY, pp. 3–24. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_1
- Saat, M.R., Aguilar Serrano, J., 2015. Multicriteria high-speed rail route selection: application to Malaysia's high-speed rail corridor prioritization. *Transp. Plan. Technol.* 38, 200–213.
- Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* 1, 83–98.
- Salcedas, T.I.D., 2016. Evolução da condição de vias-férreas (MSc). UNL-FCT.
- Salvado, F., Falcão Silva, M.J., Couto, P., 2017. Otimização de intervenções de reabilitação baseada em análises multicritério.

- Sameni, Melody Khadem, Preston, J., Sameni, Mona Khadem, 2016. Evaluating efficiency of passenger railway stations: A DEA approach. *Res. Transp. Bus. Manag.* 20, 33–38.
- Sasaoka, C.D., Davis, D., 2005. Implementing track transition solutions for heavy axle load service. Presented at the Proceedings, AREMA 2005 Annual Conference, Chicago, IL, Citeseer.
- Seara, I., Correia, A.G., 2008. Zonas de transição de vias-férreas. A importância de uma solução geoestrutural.
- Selig, E.T., Waters, J.M., 1994. Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford.
- Silva, T.S. dos S., 2012. Inspeção e reabilitação de infraestruturas ferroviárias (MSc). UNL-FCT.
- Sirikijpanichkul, A., Ferreira, L., 2005. Multi-objective evaluation of intermodal freight terminal location decisions.
- Sivilevičius, H., Maskeliūnaite, L., 2010. The criteria for identifying the quality of passengers' transportation by railway and their ranking using AHP method. *Transport* 25, 368–381.
- Smekal, A., 1997. Transition structures of railway bridges. *World Congr. Railw. Res.* Florence Italy.
- Sousa, J., Cardoso, M., 2010. Avaliação multicritério de alternativas de reabilitação em sistemas de drenagem urbana-aplicação a um caso de estudo.
- Tamirat, N.F., 2014. Multi-Criteria Decision Modelling for Infrastructure Development: A Case of Ethiopian Highway Rehabilitation Projects. *Ethiop. E-J. Res. Innov. Foresight Ee-JRIF* 6.
- Tzanakakis, K., 2013. The Railway Track and Its Long Term Behaviour, Springer Tracts on Transportation and Traffic. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36051-0>
- Tzeng, G.-H., Lin, C.-W., Opricovic, S., 2005. Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy* 33, 1373–1383.
- UIC 719R, 2008. UIC 719R: Earthworks and Track-Bed Layers for Railway Lines. Int. Union Railw. Paris.
- Vale, C.M.N.A.S., 2010. Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade (PhD). FEUP.
- Velasquez, M., Hester, P.T., 2013. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods 10, 11.
- Vreeker, R., Nijkamp, P., Ter Welle, C., 2002. A multicriteria decision support methodology for evaluating airport expansion plans. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 7, 27–47. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(01\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00005-9)
- Wang, H., Silvast, M., Markine, V., Wiljanen, B., 2017. Analysis of the Dynamic Wheel Loads in Railway Transition Zones Considering the Moisture Condition of the Ballast and Subballast. *Appl. Sci.* 7, 1208. <https://doi.org/10.3390/app7121208>
- Yong, F., Yong, Q., Shuting, Z., Wantong, L., Limin, J., Xinwang, L., Zhilong, Z., Jianying, L., 2016. Operation safety assessment of high-speed train with fuzzy group decision making method and empirical research. Presented at the Cloud Computing and Internet of Things (CCIoT), 2016 2nd International Conference on, IEEE, pp. 35–42.

ANEXOS

ANEXO I – Degradação das zonas de transição

Tipicamente, as zonas de transição apresentam uma grande variação de rigidez ao longo de uma curta distância. Assim, quando sujeitas a cargas dinâmicas podem-se gerar impactos e originar problemas significativos, contribuindo para uma degradação acelerada e tal é evidenciado pelas maiores taxas de degradação nestas zonas comparativamente à plena via. Tal é fundamentado por diversos estudos desenvolvidos a nível Europeu que identificaram as zonas de transição, nomeadamente de transição de via em aterro para ponte, como regiões que necessitam especial cuidado, particularmente nos trabalhos de inspeção, manutenção e renovação. Mediante informações recolhidas junto de várias empresas que gerem as infraestruturas ferroviárias concluiu-se que, comparativamente com a plena via, nas zonas de transição a frequência de manutenção é cerca de cinco vezes mais elevada e os custos inerentes duas vezes maiores. Desta forma, pode-se afirmar que a natureza das zonas de transição conduz ao aumento dos custos de manutenção, afeta a disponibilidade da via e provoca perturbações na operação ferroviária (Dahlberg, 2003; ERRI, 1999; Fortunato et al., 2016; Lundqvist et al., 2006; Paixão, 2014; Read e Li, 2006; Ribeiro, 2012; Seara e Correia, 2008).

Efetuada uma pesquisa bibliográfica, verificou-se que, tradicionalmente, as soluções para as zonas de transição de vias férreas passavam por uma abordagem a nível estrutural ou estritamente geotécnica. Muitos estudos apontam as variações de rigidez que ocorrem nas zonas de transição como a causa principal de degradação registada (Cerdeiral, 2014; Ribeiro, 2012; Seara e Correia, 2008).

Alguns fatores podem aumentar significativamente a interação dinâmica veículo-via se a zona de transição não for adequadamente projetada e/ou a manutenção da via não for adequada. Neste cenário, os componentes dos veículos e da via podem evidenciar uma taxa de degradação elevada, o conforto dos passageiros diminui e o risco de descarrilamento pode aumentar (Fortunato et al., 2016).

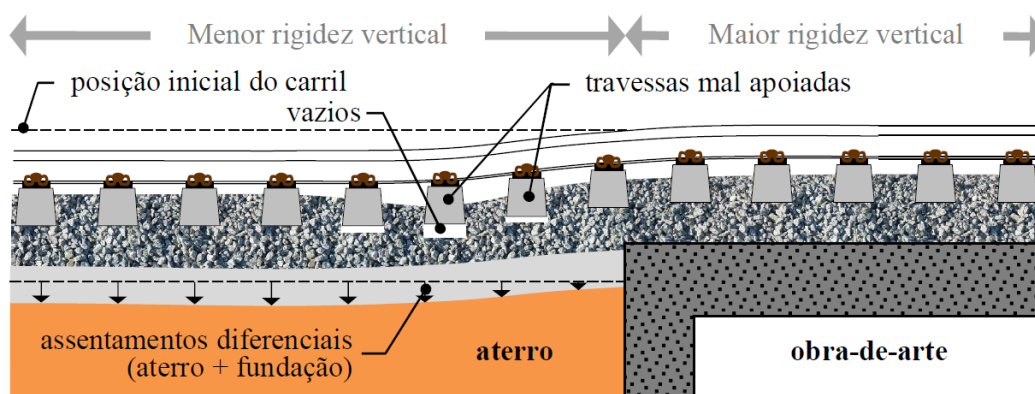


Figura I.1 – Transição de via em aterro para obra-de-arte (Fortunato et al., 2016)

Apesar da origem dos problemas associados às transições das vias-férreas não ser completamente conhecida, é possível destacar os principais aspetos (Figura I.1) que desencadeiam e aumentam a degradação nesses locais (Dahlberg, 2003; Paixão et al., 2015; Read e Li, 2006; Ribeiro, 2012; Sasaoka e Davis, 2005; Seara e Correia, 2008): i) variações abruptas da rigidez vertical da via devido a distintas condições de apoio (mais flexíveis nas zonas de terraplenagens e mais rígidas sobre a obra de arte); ii) variação das forças de interação dinâmica roda-carril; iii) assentamentos diferenciais; iv) aparecimento de travessas flutuantes. De notar que, a degradação pode ser amplificada pela combinação destes mesmos fatores.

De seguida, apresenta-se uma breve descrição desses mesmos fatores:

i) Rigidez vertical da via:

A rigidez da via (k) é um parâmetro que relaciona a carga aplicada (P) com o deslocamento máximo (y_m) medido no ponto de aplicação da carga. Esta pode ser calculada pela Equação I.1:

$$k = \frac{P}{y_m} \quad (\text{I.1})$$

Uma mudança abrupta de rigidez ocorre nas zonas de transição devido às diferentes características mecânicas dos materiais da superestrutura ou subestrutura. Por exemplo, uma ponte constituída por um tabuleiro de betão sobre pilares de elevada rigidez, confere à via um módulo elevado quando comparado com as zonas em aterro da via contíguas à ponte. Um outro exemplo pode ser a simples variação da profundidade de uma camada da fundação que pode originar importantes variações de rigidez. Uma mudança abrupta da rigidez da via não causa nem contribui só por si para a sua própria degradação, mas, forças dinâmicas elevadas associadas a um pequeno desnível entre as superfícies podem induzir forças de impacto elevadas. Assim, e com base em vários estudos efetuados pode-se afirmar que a variação brusca de rigidez contribui para a degradação prematura e para os assentamentos diferenciais que ocorrem na via (Berggren, 2009; Dahlberg, 2003; ERRI, 1999; Paixão et al., 2015; Ribeiro, 2012; Sasaoka e Davis, 2005).

A avaliação da rigidez é importante, contudo, uma vez que esta não é constante ao longo da via, é sobretudo importante avaliar as suas variações. Assim, a medição contínua da rigidez e a sua relação com o perfil longitudinal da via no local permite associar as variações de rigidez à existência de zonas de transição (Berggren, 2009; Ribeiro, 2012).

ii) Variação das forças dinâmicas

A variação de rigidez provoca o aumento das forças de interação roda-carril conforme vários estudos têm comprovado. Assim, a amplificação de cargas dinâmicas nestes locais causa danos adicionais para a via, podendo conduzir a casos graves de defeitos de geometria da via,

tais como irregularidades no perfil longitudinal do carril ou mesmo travessas flutuantes. Na zona de transição são registados ‘picos’ de força que são tanto maiores quanto maior a diferença de rigidez no local e a velocidade de circulação do veículo (da Silva Ferreira, 2013; Lundqvist e Dahlberg, 2005; Ribeiro, 2012).

iii) Assentamentos diferenciais

O assentamento da via é particularmente importante quando ocorre de forma diferencial, ou seja, de forma não uniforme ao longo da via. Segundo a entidade responsável pela gestão das infraestruturas ferroviárias dos Países Baixos, estas diferenças de deformabilidade originam picos de acelerações do veículo com consequente aumento da carga na via antes e depois da ponte. Nas zonas de transição existem diferentes fatores que favorecem a ocorrência de assentamentos diferenciais, tais como: i) a existência de tráfego ferroviário; ii) fenómenos de consolidação e fluência dos solos de fundação e aterros; iii) a interação entre o aterro e a estrutura; iv) e efeitos dinâmicos. De referir apenas que, embora o assentamento devido ao tráfego ocorra exclusivamente durante a fase de operação da via, os restantes podem ocorrer após a construção devido a fenómenos de consolidação ou fluência. Estes fatores, separadamente ou de forma complementar, propiciam o aparecimento de assentamentos diferenciais (Dahlberg, 2003; ERRI, 1999; Ribeiro, 2012).

Relativamente aos assentamentos induzidos pelo tráfego ferroviário, verifica-se que após milhares de passagens dos veículos ocorre o assentamento das camadas da via. Como o carregamento da via não é uniforme ocorrem assentamentos diferenciais que implicam a alteração da geometria da via. Surgem assim irregularidades que induzem excitação do veículo e consequente variação da carga dinâmica que, podendo ser ainda maior do que a induzida pela variação de rigidez, promove o agravamento dos assentamentos (Esveld, 2001; Ribeiro, 2012).

Por outro lado, e ao longo do tempo, como consequência de fenómenos de consolidação, a via tende a sofrer assentamentos, principalmente nas zonas em aterro. No documento UIC 719R, mais especificamente na secção dedicada ao dimensionamento e construção de aterros, encontra-se uma recomendação para a construção de aterros, indicando os requisitos base relativos ao controlo dos materiais a utilizar, bem como para a sua compactação. A presença de água constitui um grande problema na estabilidade dos aterros, pelo que a incorporação de sistemas de drenagem eficientes é essencial. Uma prática corrente passa pela incorporação de materiais geossintéticos ou material granular junto às estruturas de betão de forma a possibilitar a adequada condução das águas. Em certos casos, e na presença de materiais que respondem em condições não drenadas (por exemplo, materiais lodosos), recorre-se a processos de aceleração da consolidação com a aplicação de pré-cargas e/ou de geodrenos verticais (Ribeiro, 2012; UIC 719R, 2008).

Uma outra situação diz respeito aos assentamentos induzidos por estruturas. Por exemplo, em zonas de transição aterro-ponte, a interação entre o aterro e a estrutura pode promover tam-

bém o aparecimento de assentamentos, uma vez que em aterro a maior parte da elasticidade vertical da via deriva da deformação do subsolo e do balastro, enquanto que sendo a maior parte das pontes fundada em estacas, não é possível mobilizar essa mesma elasticidade na via assente sobre a ponte. Em geral, as deformações que ocorrem nestas zonas de transição são devidas aos assentamentos do aterro por inadequada compactação, a movimentos da ponte ou da via induzidos pelo carregamento ou por variações de temperatura. Assim, fatores como a localização das juntas de dilatação da via, o tipo de ponte e de encontro, o tipo de estrutura de transição, a maior ou menor facilidade de compactação junto ao encontro ou o sistema de drenagem adotado, contribuem largamente para a definição do comportamento a longo prazo de uma transição aterro-ponte (Ribeiro, 2012).

O levantamento da via na zona de transição na sequência da flexão da ponte é um problema típico. Na Figura I.2 é possível verificar que quando um comboio se encontra sobre a ponte, a via flete juntamente com o tabuleiro, impondo o levantamento da via na proximidade do encontro. Sob as travessas desta zona o balastro é descarregado e carregado de forma cíclica, propiciando o desenvolvimento de tensões elevadas e o aparecimento de deformações no balastro e nas camadas subjacentes (Hess, 2008).

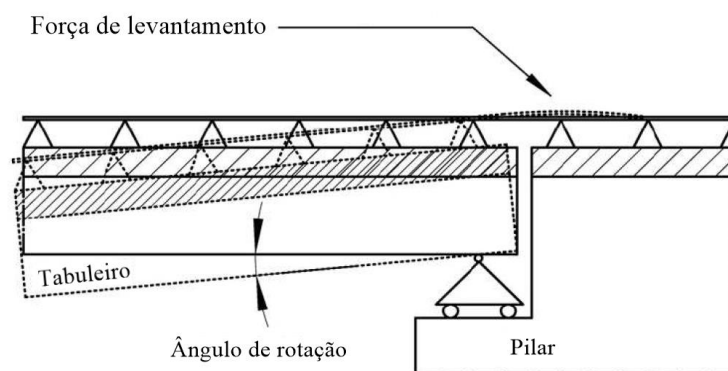


Figura I.2 - Representação esquemática do efeito da rotação do tabuleiro da ponte (adaptado de Hess, 2008)

Outro problema típico das transições é o aparecimento de folgas junto ao encontro causadas por movimentos longitudinais da estrutura da ponte, induzidos por forças horizontais ou efeitos térmicos, cuja repetição origina a compactação gradual das camadas de balastro e fundação. Este processo caracteriza-se pelo desenvolvimento de um plano de rutura passivo quando a ponte dilata e, um plano de rutura ativo quando contrai. Este é um fenómeno muito frequente em pontes integrais onde não existem juntas de dilatação nem nos vãos, nem junto aos encontros, sendo a dilatação térmica da ponte responsável pela compactação das camadas da via. Assim, aspetos como o tipo de ponte ou o tipo e fundação do encontro podem condicionar toda a dinâmica da zona de transição. De realçar que o tipo de fundação do encontro depende das características resistentes e de deformabilidade do solo de fundação, do tipo de ponte e da implantação desta no terreno (Ribeiro, 2012; Smekal, 1997).

Os efeitos dinâmicos são também um dos fatores a considerar. Com base numa irregularidade geométrica semelhante à apresentada na Figura I.3 foram desenvolvidos estudos sobre o comportamento dinâmico da zona de transição e os seus efeitos induzidos pela alteração do perfil da via. Esses estudos permitiram concluir que quanto maior é a inclinação do perfil, maiores são as forças de interação veículo-via e as acelerações no veículo. Outro aspeto verificado é a amplificação considerável destes efeitos com o aumento da velocidade.

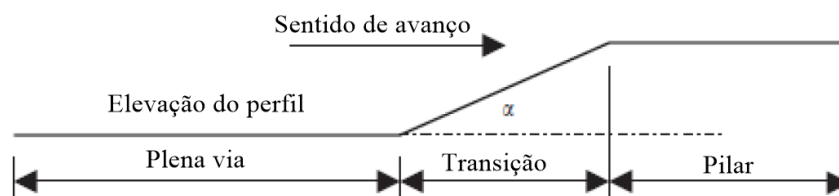


Figura I.3 – Geometria da zona de transição (adaptado de Lei e Mao, 2004)

iv) Travessas flutuantes

Designam-se por travessas flutuantes as travessas cujo contacto com a camada de balastro é reduzido ou inexistente, em virtude da existência de vazios entre a base da travessa e a superfície da camada de balastro. O aparecimento de vazios entre as travessas e a camada de balastro, sendo consequência dos assentamentos da via, é também responsável pelo aumento destes assentamentos uma vez que propicia o aumento das forças dinâmicas. Assim, é perceptível que as zonas de transição sejam locais propícios ao desenvolvimento de travessas flutuantes (Ribeiro, 2012).

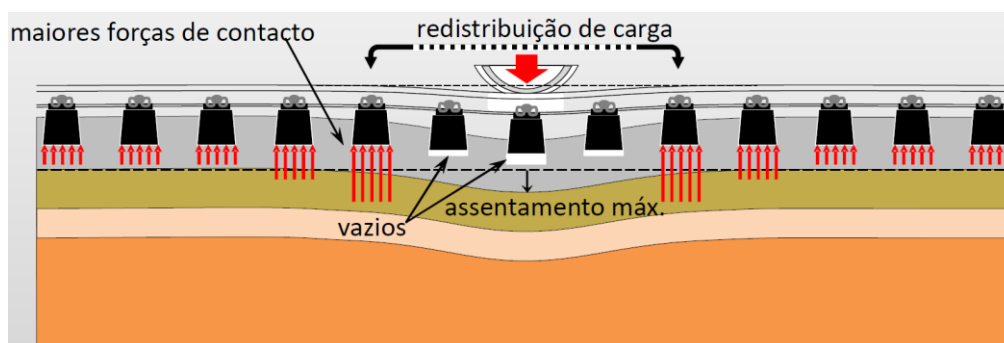


Figura I.4 – Análise de forças de contacto em travessas mal apoiadas (Paixão e Fortunato, 2018)

Alguns estudos revelam que a partir do momento em que surgem na via travessas flutuantes (Lundqvist e Dahlberg, 2005): i) a degradação acelera significativamente com o aparecimento de outros fenómenos, como partículas de balastro fraturadas e travessas partidas; ii) ocorre uma amplificação importante das forças de interação dinâmicas veículo-via, originando uma transmissão às travessas vizinhas de forças muito superiores às normalmente aplicadas (Figura I.4); iii) existe uma diminuição da resistência lateral da via e aumento do risco de encurvadura.

Assim, o aparecimento de travessas flutuantes tem grande influência na degradação dos restantes constituintes da via, nomeadamente do carril, uma vez que propiciam o aumento das tensões de flexão, colocando em causa as soldaduras, que podem romper precocemente por fadiga (Ishida et al., 1999).

ANEXO II – Instruções para o inquérito

Instruções

Análise multicritério aplicada na reabilitação ferroviária

Neste documento apresentam-se alguns conceitos e simultaneamente um exemplo prático com o objetivo de facilitar o inquirido a responder ao inquérito proposto e assim, que sejam obtidas respostas mais perto daquela que é a sua real convicção.

O exemplo proposto tem como objetivo principal a “Escolha de um automóvel”. Tendo em conta as características do “problema” consideraram-se quatro critérios relevantes para o comprador: conforto, consumo de combustível, dimensões do veículo e velocidade máxima; conforme ilustra a árvore abaixo.

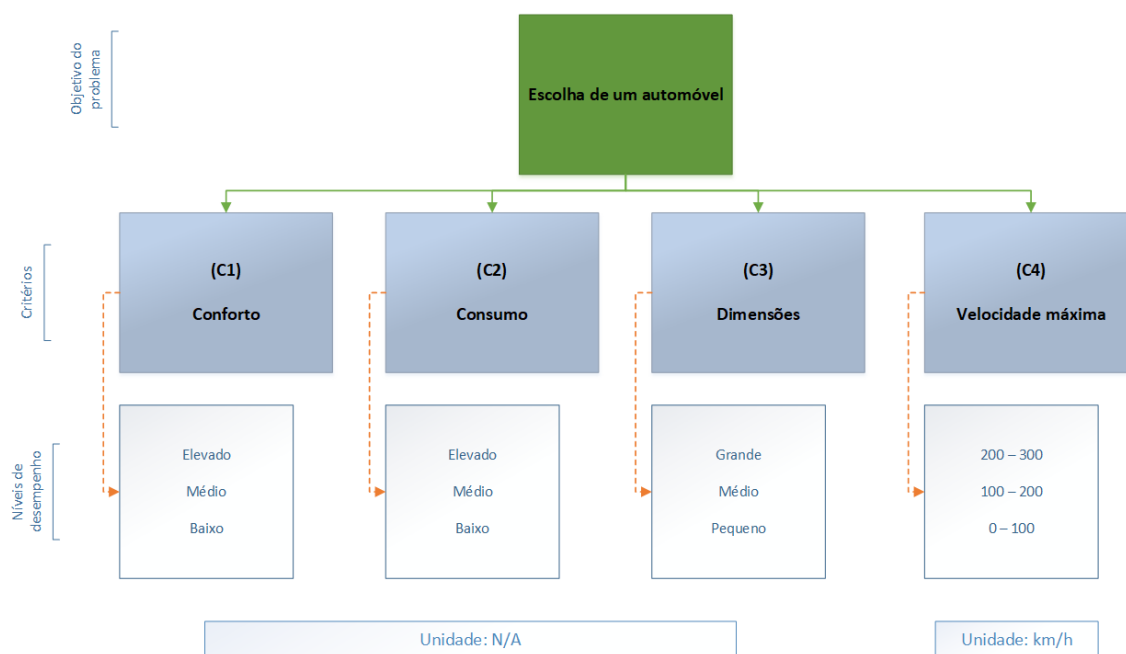


Figura II.1 – Árvore de valores

A cada critério estão associados níveis de desempenho que podem ser qualitativos ou quantitativos. Neste exemplo, os critérios C1, C2 e C3 apresentam níveis de desempenho qualitativos e o C4 níveis de desempenho quantitativos.

O passo seguinte, que corresponde à Questão 1 do inquérito, é realizar uma **comparação par-a-par entre níveis de desempenho**, isto é, indicar o nível de atratividade existente entre dois níveis de desempenho de acordo com a Escala semântica do MACBETH (Tabela II.1). O MACBETH é uma das possíveis metodologias de análise multicritério.

Tabela II.1 – Escala semântica do MACBETH

Escala semântica	Número de escala equivalente	Significado
Nula	0	Indiferença entre alternativas / Diferença de atratividade nula
Muito fraca	1	Uma alternativa é muito pouco atrativa face à outra
Fraca	2	Uma alternativa é pouco atrativa face à outra
Moderada	3	Uma alternativa é moderadamente atrativa face à outra
Forte	4	Uma alternativa é fortemente atrativa face à outra
Muito forte	5	Uma alternativa é muito fortemente atrativa face à outra
Extrema	6	Uma alternativa é extremamente mais atrativa face à outra

A matriz abaixo apresenta os níveis de desempenho do primeiro critério (**Conforto**). Neste caso, o conforto é “medido” em termos qualitativos (elevado, médio e baixo).

C1 - Conforto (unid.: N/A)			
	Elevado	Médio	Baixo
Elevado	nula		
Médio	-	nula	
Baixo	-	-	nula

Seguem-se as seguintes questões para a comparação par-a-par:

- Qual é a diferença de atratividade entre “Elevado” e “Baixo” para o Conforto? R: Extrema (6)
- Qual é a diferença de atratividade entre “Médio” e “Baixo” para o Conforto? R: Forte (4)
- Qual é a diferença de atratividade entre “Elevado” e “Médio” para o Conforto? R: Moderada (3)

Após responder a cada uma das questões com um valor de **0 a 6** deve-se preencher o espaço em branco correspondente à comparação e prosseguir para uma próxima comparação. Para o exemplo dado, a matriz final deveria apresentar o seguinte aspeto:

C1 - Conforto (unid.: N/A)			
	Elevado	Médio	Baixo
Elevado	nula	3	6
Médio	-	nula	4
Baixo	-	-	nula

Nota 1: Para matrizes de maiores dimensões é aconselhável iniciar o preenchimento pela seguinte ordem: i) última coluna a partir do topo para o fundo; ii) primeira linha da esquerda para a direita; iii) diagonal da matriz a partir do topo.

Nota 2: Em cada resposta pode utilizar sempre um valor de 0 a 6 independentemente de já ter atribuído esse mesmo valor numa resposta anterior.

O próximo e último passo, que corresponde à Questão 3 do inquérito, é atribuir uma pontuação (de **0 a 6**) aos critérios consoante o grau de importância e de relevância para o objetivo principal que, neste exemplo é a “Escolha de um automóvel”.

Critério		Pontuação (0-6)
C1	Conforto	5
C2	Consumo	6
C3	Dimensões	2
C4	Velocidade máxima	4

Conforme ilustra a tabela acima, para o comprador o critério mais importante é o consumo, seguido do conforto e da velocidade máxima e, por último, as dimensões do veículo.

Nota: Em cada critério pode utilizar sempre um valor de 0 a 6 independentemente de já ter atribuído essa mesma pontuação num critério anterior.

Inquérito

Análise multicritério aplicada na reabilitação ferroviária

Este inquérito insere-se no âmbito de uma dissertação de Mestrado em desenvolvimento na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. O mesmo visa a recolha de informação para a realização de um estudo que tem como objetivo a determinação da solução de reabilitação da infraestrutura com melhor relação custo-benefício de um trecho de via-férrea balastrada situado em Portugal Continental.

Peço-lhe, assim, que seja o mais rigoroso possível no seu preenchimento, devendo para tal analisar previamente o documento de instruções. Desde já, apresento-lhe os meus sinceros agradecimentos pela sua disponibilidade e preciosa contribuição, pois de modo contrário este trabalho não seria de todo concretizável.

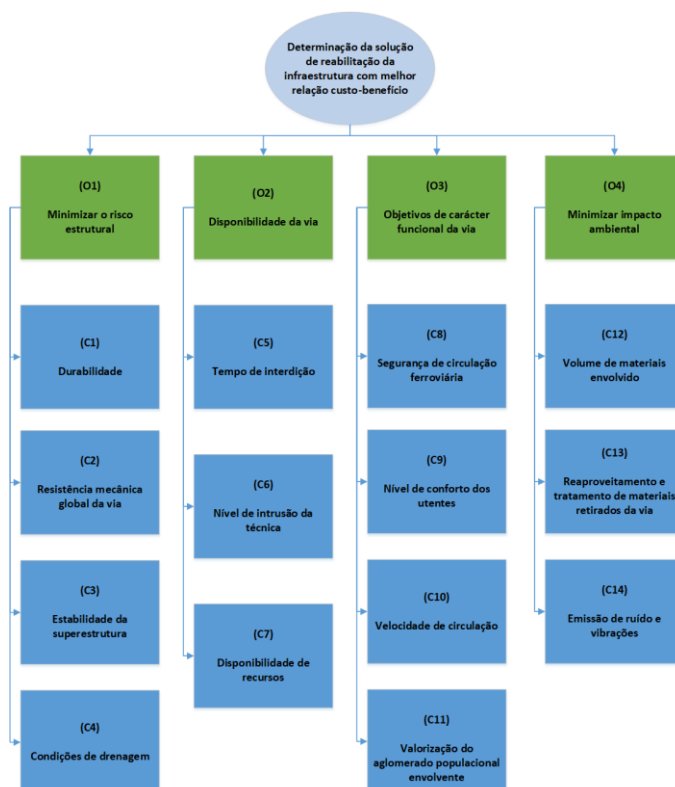


Figura III.1 – Árvore de valores

Questões:

- 1) De seguida, apresentam-se os diversos critérios com a respetiva descrição para um melhor enquadramento. **Por cada critério** existe **uma matriz** com os **níveis de desempenho**. Solicita-se que, de acordo com as instruções fornecidas, realize a **comparação par-a-par** entre níveis de desempenho. Para tal, preencha os espaços em branco de cada matriz com um valor de **0 a 6** adequado ao seu juízo de valor, onde **0** corresponde a uma diferença de atratividade nula e, **6** a uma diferença extrema de atratividade (ver Tabela 1 – Escala semântica do MACBETH no documento Instruções).

Critério 1: Durabilidade

Este critério refere-se à capacidade de preservação das características funcionais sem necessidade de manutenção ou reparação. Por outras palavras, a durabilidade corresponde ao inverso da degradação ao longo do tempo, estando por isso associada à velocidade com que esta se desenvolve. A escala quantitativa de C1 é expressa em intervalos de valores que correspondem à situação em que surge a necessidade de se voltar a intervir.

C1 - Durabilidade (unid.: nº de anos)					
	20 - 25	15 - 20	10 - 15	5 - 10	0 - 5
20 - 25	nula				
15 - 20	-	nula			
10 - 15	-	-	nula		
5 - 10	-	-	-	nula	
0 - 5	-	-	-	-	nula

Critério 2: Resistência mecânica global da via

A resistência mecânica global da via traduz-se pela capacidade de suporte face às solicitações externas sem que estas originem degradações. As solicitações externas devem-se fundamentalmente à passagem do material circulante. C2 pretende avaliar a relação existente entre a resistência mecânica antes e após a implementação da solução de reabilitação.

C2 - Resistência mecânica global da via (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
Elevada	nula				
Median. Elev.	-	nula			
Média	-	-	nula		
Baixa	-	-	-	nula	
Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Critério 3: Estabilidade da superestrutura

A superestrutura é convencionalmente composta pelo armamento da via: carris, sistemas de fixação, palmilhas elásticas e travessas; e ainda pela camada de balastro. A caracterização da estabilidade da superestrutura está fortemente associada aos padrões de qualidade dos parâmetros geométricos de via. C3 pretende avaliar as condições de estabilidade proporcionadas

pelo armamento da via e camada de balastro após a reabilitação ferroviária.

C3 - Estabilidade da superestrutura (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
Elevada	nula				
Median. Elev.	-	nula			
Média	-	-	nula		
Baixa	-	-	-	nula	
Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Critério 4: Condições de drenagem

Avalia o nível de eficiência da drenagem de águas que interfiram, tanto a nível da superestrutura como da subestrutura, no correto funcionamento da infraestrutura ferroviária.

C4 - Condições de drenagem (unid.: N/A)					
	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas
Elevadas	nula				
Median. Elev.	-	nula			
Médias	-	-	nula		
Baixas	-	-	-	nula	
Mt. Baixas	-	-	-	-	nula

Critério 5: Tempo de interdição

O tempo de interdição refere-se ao período em que se interrompe a circulação ferroviária de modo a existirem condições para o desenvolvimento dos trabalhos de reabilitação. É usual que os trabalhos sejam realizados durante a noite de modo a não interferir com a desejada circulação de comboios. Note-se que quanto mais duradora for a implementação da solução, maior será o período em que existirão restrições de velocidade de circulação. C5 pretende avaliar a influência da implementação de uma dada solução de reabilitação na correta operacionalidade da via-férrea.

C5 - Tempo de interdição (unid.: nº de períodos noturnos)					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 40
0 - 5	nula				
5 - 10	-	nula			
10 - 15	-	-	nula		
15 - 20	-	-	-	nula	
20 - 40	-	-	-	-	nula

Critério 6: Nível de intrusão da técnica

Avalia, em termos percentuais, o grau de intrusão da técnica de reabilitação na infraestrutura ferroviária, isto é, a dimensão da intervenção. Tal pode ser obtido pela razão entre a(s) parte(s) da infraestrutura a reabilitar e a totalidade da constituição da infraestrutura.

C6 - Nível de intrusão da técnica (unid.: percentagem)					
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 20	nula				
20 - 40	-	nula			
40 - 60	-	-	nula		
60 - 80	-	-	-	nula	
80 - 100	-	-	-	-	nula

Critério 7: Disponibilidade de recursos

Para que uma solução de reabilitação seja exequível é necessário dispor de determinados recursos, tais como, materiais, mão-de-obra especializada e equipamentos. A falta de qualquer tipo de recursos pode causar fortes implicações a vários níveis, como por exemplo na calendarização de trabalhos. C7 pretende estimar a taxa de disponibilidade desses mesmos recursos.

C7 - Disponibilidade de recursos (unid.: N/A)					
	Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa
Imediata	nula				
Elevada	-	nula			
Média	-	-	nula		
Baixa	-	-	-	nula	
Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Critério 8: Segurança de circulação ferroviária

Avalia o grau de segurança fornecido aos utentes após a reabilitação ferroviária. Este critério procura contabilizar a segurança existente ao se respeitarem as normas de circulação. A não existência de condições adequadas de segurança pode originar a ocorrência de descarrilamentos, choques entre comboios e/ou choques de comboios com outros objetos.

C8 - Segurança de circulação ferroviária (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
Mt. Elevada	nula				
Elevada	-	nula			
Median. Elev.	-	-	nula		
Média	-	-	-	nula	
Baixa	-	-	-	-	nula

Critério 9: Nível de conforto dos utentes

Avalia a satisfação dos utentes no que respeita ao seu conforto em circulação após a execução da reabilitação da infraestrutura ferroviária.

C9 - Nível de conforto dos utentes (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
Mt. Elevada	nula				
Elevada	-	nula			
Median. Elev.	-	-	nula		
Média	-	-	-	nula	
Baixa	-	-	-	-	nula

Critério 10: Velocidade de circulação

Avalia a relação existente entre a velocidade praticada antes e após a implementação da solução de reabilitação. C10 apresenta uma escala quantitativa percentual que varia entre os 0% e os 100%. Por exemplo, o valor de 20% corresponde a um aumento de 20% da velocidade após a intervenção.

C10 - Velocidade de circulação (unid.: percentagem)					
	80 - 100	60 - 80	40 - 60	20 - 40	0 - 20
80 - 100	nula				
60 - 80	-	nula			
40 - 60	-	-	nula		
20 - 40	-	-	-	nula	
0 - 20	-	-	-	-	nula

Critério 11: Valorização do aglomerado populacional envolvente

Uma obra de reabilitação ferroviária pode trazer benefícios económicos para o aglomerado populacional circundante, como por exemplo, no que respeita ao crescimento das transações comerciais e de turismo.

C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente (unid.: N/A)						
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
Mt. Elevada	nula					
Elevada	-	nula				
Median. Elev.	-	-	nula			
Média	-	-	-	nula		
Baixa	-	-	-	-	nula	
Mt. Baixa	-	-	-	-	-	nula

Critério 12: Volume de materiais envolvido

Os materiais surgem dum processo produtivo que inicia com a obtenção da matéria-prima no meio ambiente e termina num produto final. A este processo encontra-se associada uma determinada quantidade de energia despendida. Neste sentido, quanto maior a quantidade de materiais empregues, maiores serão as mudanças climáticas, maior será a contaminação atmosférica, provocando uma redução da biodiversidade e conduzindo a um esgotamento dos recursos naturais. Resumidamente, um maior volume de matéria-prima encontra-se associado a uma maior perturbação do meio ambiente.

C12 - Volume de materiais envolvido (unid.: N/A)				
	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
Baixa	nula			
Média	-	nula		
Median. Elev.	-	-	nula	
Elevada	-	-	-	nula

Critério 13: Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via

Avalia a possível taxa de reciclagem dos materiais existentes antes da reabilitação da via-férrea.

C13 - Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Nula
Elevada	nula				
Median. Elev.	-	nula			
Média	-	-	nula		
Baixa	-	-	-	nula	
Nula	-	-	-	-	nula

Critério 14: Emissão de ruído e vibrações

Avalia a emissão de ruído e vibrações por parte dos comboios em circulação após a implementação da solução de reabilitação.

C14 - Emissão de ruído e vibrações (unid.: N/A)					
	Mt. Baixa	Baixa	Baixa	Median. Elev.	Elevada
Mt. Baixa	nula				
Baixa	-	nula			
Média	-	-	nula		
Median. Elev.	-	-	-	nula	
Elevada	-	-	-	-	nula

- 2) Analise criticamente a árvore de valores presente na Figura 1, a descrição de cada critério e os níveis de desempenho presentes na questão 1. O espaço abaixo é dedicado a comentários decorrentes da análise efetuada. Indique se, por exemplo: i) detetou critérios dependentes entre si; ii) pretende adicionar algum objetivo/critério à árvore de valores relevante para o problema em estudo, ou mesmo remover algum; iii) os níveis de desempenho definidos para determinado critério são inapropriados ou incompletos.

R: _____

- 3) Atribua uma pontuação de **0 a 6 valores** aos critérios presentes na Tabela abaixo consoante o grau de importância e de relevância que atribui a cada um deles para uma situação de reabilitação ferroviária, onde **0** corresponde a um critério irrelevante e, **6** a um critério extremamente relevante.

Critério		Pontuação (0-6)
C1	Durabilidade	
C2	Resistência mecânica global da via	
C3	Estabilidade da superestrutura	
C4	Condições de drenagem	
C5	Tempo de interdição	
C6	Nível de intrusão da técnica	
C7	Disponibilidade de recursos	
C8	Segurança de circulação ferroviária	
C9	Nível de conforto dos utentes	
C10	Velocidade de circulação	
C11	Valorização do aglomerado populacional envolvente	
C12	Volume de materiais envolvido	
C13	Reaproveitamento e tratamento de materiais retirados da via	
C14	Emissão de ruído e vibrações	

ANEXO IV – Respostas dos especialistas

De seguida, apresentam-se as respostas dos especialistas à Questão 1, a matriz representativa e a matriz MACBETH para cada o critério. Recordar-se a utilização do esquema de cores em concordância com o ilustrado anteriormente na Figura 5.21.

• Critério 1

Representativa	C1 - Durabilidade (unid.: nº de anos)					
		20 - 25	15 - 20	10 - 15	5 - 10	0 - 5
	20 - 25	nula	2	4	5	6
	15 - 20	-	nula	2	4	5.55
	10 - 15	-	-	nula	2	5
	5 - 10	-	-	-	nula	2
	0 - 5	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C1 - Durabilidade (unid.: nº de anos)					
		20 - 25	15 - 20	10 - 15	5 - 10	0 - 5
	20 - 25	nula	2	4	5	6
	15 - 20	-	nula	2	4	5.5
	10 - 15	-	-	nula	2	5
	5 - 10	-	-	-	nula	2
	0 - 5	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C1 - Durabilidade (unid.: nº de anos)					
		20 - 25	15 - 20	10 - 15	5 - 10	0 - 5
	20 - 25	nula	2	4	5	6
	15 - 20	-	nula	2	4	5
	10 - 15	-	-	nula	2	4
	5 - 10	-	-	-	nula	2
	0 - 5	-	-	-	-	nula

Projetista	C1 - Durabilidade (unid.: nº de anos)					
		20 - 25	15 - 20	10 - 15	5 - 10	0 - 5
	20 - 25	nula	3	4	5	6
	15 - 20	-	nula	3	4	6
	10 - 15	-	-	nula	2	5
	5 - 10	-	-	-	nula	2
	0 - 5	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C1 - Durabilidade (unid.: nº de anos)					
		20 - 25	15 - 20	10 - 15	5 - 10	0 - 5
	20 - 25	nula	2	4	5	6
	15 - 20	-	nula	2	4	6
	10 - 15	-	-	nula	2	5
	5 - 10	-	-	-	nula	2
	0 - 5	-	-	-	-	nula

Utente	C1 - Durabilidade (unid.: nº de anos)					
		20 - 25	15 - 20	10 - 15	5 - 10	0 - 5
	20 - 25	nula	1	1	3	5
	15 - 20	-	nula	1	3	5
	10 - 15	-	-	nula	4	6
	5 - 10	-	-	-	nula	6
	0 - 5	-	-	-	-	nula

• Critério 2

Representativa	C2 - Resistência mecânica global da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Elevada	nula	1.9	3.75	5.55	6
	Median. Elev.	-	nula	2.1	4	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	2.5
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C2 - Resistência mecânica global da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Elevada	nula	2	4	5.5	6
	Median. Elev.	-	nula	2	4	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	2.5
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C2 - Resistência mecânica global da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Elevada	nula	1	3	5	6
	Median. Elev.	-	nula	1	3	5
	Média	-	-	nula	1	3
	Baixa	-	-	-	nula	1
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Projetista	C2 - Resistência mecânica global da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Elevada	nula	3	4	6	6
	Median. Elev.	-	nula	3	4	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C2 - Resistência mecânica global da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Elevada	nula	2	5	6	6
	Median. Elev.	-	nula	3	4	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Utente	C2 - Resistência mecânica global da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Elevada	nula	1	3	5	6
	Median. Elev.	-	nula	1	4	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	nula	5
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

• Critério 3

Representativa	C3 - Estabilidade da superestrutura (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Elevada	nula	2.55	3.45	4.55	6
	Median. Elev.	-	nula	2.75	5	6
	Média	-	-	nula	3	4.2
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C3 - Estabilidade da superestrutura (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Elevada	nula	2	3	4	5
	Median. Elev.	-	nula	2	3	4
	Média	-	-	nula	2	3
	Baixa	-	-	-	nula	2
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C3 - Estabilidade da superestrutura (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Elevada	nula	3	3	4	6
	Median. Elev.	-	nula	4	5	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C3 - Estabilidade da superestrutura (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Elevada	nula	2.5	3.5	4.5	6
	Median. Elev.	-	nula	3	5	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Projetista	C3 - Estabilidade da superestrutura (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Elevada	nula	3	4	5	6
	Median. Elev.	-	nula	3	5	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Utente	C3 - Estabilidade da superestrutura (unid.: N/A)					
	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Elevada	nula	2	4	6	6
	Median. Elev.	-	nula	2	5	6
	Média	-	-	nula	4	6
	Baixa	-	-	-	nula	4
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

• Critério 4

Representativa	C4 - Condições de drenagem (unid.: N/A)					
	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas	
	Elevadas	nula	2	3.45	4.45	5.35
	Median. Elev.	-	nula	2.45	3.8	5
	Médias	-	-	nula	2.55	4.1
	Baixas	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixas	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C4 - Condições de drenagem (unid.: N/A)					
	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas	
	Elevadas	nula	2	3	4	5
	Median. Elev.	-	nula	2	3	4
	Médias	-	-	nula	2	3
	Baixas	-	-	-	nula	2
	Mt. Baixas	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C4 - Condições de drenagem (unid.: N/A)					
	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas	
	Elevadas	nula	2	4	5	6
	Median. Elev.	-	nula	3	4	6
	Médias	-	-	nula	3	5
	Baixas	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixas	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C4 - Condições de drenagem (unid.: N/A)					
	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas	
	Elevadas	nula	2	3.5	4.5	5.5
	Median. Elev.	-	nula	2.5	4	5
	Médias	-	-	nula	2.5	4
	Baixas	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixas	-	-	-	-	nula

Projetista	C4 - Condições de drenagem (unid.: N/A)					
	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas	
	Elevadas	nula	3	4	5	6
	Median. Elev.	-	nula	3	5	6
	Médias	-	-	nula	3	5
	Baixas	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixas	-	-	-	-	nula

Utente	C4 - Condições de drenagem (unid.: N/A)					
	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas	
	Elevadas	nula	1	2	3	3
	Median. Elev.	-	nula	1	2	3
	Médias	-	-	nula	2	3
	Baixas	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixas	-	-	-	-	nula

• Critério 5

Representativa	C5 - Tempo de interdição (unid.: nº de períodos noturnos)					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 40	
	0 - 5	nula	2.45	3.45	4.55	6
	5 - 10	-	nula	2	4	5.45
	10 - 15	-	-	nula	2	4
	15 - 20	-	-	-	nula	3
	20 - 40	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C5 - Tempo de interdição (unid.: nº de períodos noturnos)					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 40	
	0 - 5	nula	3	4	5	6
	5 - 10	-	nula	3	4	5
	10 - 15	-	-	nula	3	4
	15 - 20	-	-	-	nula	3
	20 - 40	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C5 - Tempo de interdição (unid.: nº de períodos noturnos)					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 40	
	0 - 5	nula	2	3	4	6
	5 - 10	-	nula	2	5	6
	10 - 15	-	-	nula	2	4
	15 - 20	-	-	-	nula	3
	20 - 40	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C5 - Tempo de interdição (unid.: nº de períodos noturnos)					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 40	
	0 - 5	nula	2.5	3.5	4.5	6
	5 - 10	-	nula	2	4	5.5
	10 - 15	-	-	nula	2	4
	15 - 20	-	-	-	nula	3
	20 - 40	-	-	-	-	nula

Projetista	C5 - Tempo de interdição (unid.: nº de períodos noturnos)					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 40	
	0 - 5	nula	2	3	4	6
	5 - 10	-	nula	2	4	6
	10 - 15	-	-	nula	2	4
	15 - 20	-	-	-	nula	3
	20 - 40	-	-	-	-	nula

Utente	C5 - Tempo de interdição (unid.: nº de períodos noturnos)					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 40	
	0 - 5	nula	3	4	6	6
	5 - 10	-	nula	2	4	4
	10 - 15	-	-	nula	2	2
	15 - 20	-	-	-	nula	2
	20 - 40	-	-	-	-	nula

- Critério 6

Representativa	C6 - Nível de intrusão da técnica (unid.: percentagem)					
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	0 - 20	nula	3	4	5.55	6
	20 - 40	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	60 - 80	-	-	-	nula	3
	80 - 100	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C6 - Nível de intrusão da técnica (unid.: percentagem)					
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	0 - 20	nula	3	4	5	6
	20 - 40	-	nula	3	4	5
	40 - 60	-	-	nula	3	4
	60 - 80	-	-	-	nula	3
	80 - 100	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C6 - Nível de intrusão da técnica (unid.: percentagem)					
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	0 - 20	nula	3	5	6	6
	20 - 40	-	nula	3	6	6
	40 - 60	-	-	nula	4	5
	60 - 80	-	-	-	nula	4
	80 - 100	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C6 - Nível de intrusão da técnica (unid.: percentagem)					
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	0 - 20	nula	3	4	5.5	6
	20 - 40	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	60 - 80	-	-	-	nula	3
	80 - 100	-	-	-	-	nula

Projetista	C6 - Nível de intrusão da técnica (unid.: percentagem)					
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	0 - 20	nula	3	4	6	6
	20 - 40	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	60 - 80	-	-	-	nula	3
	80 - 100	-	-	-	-	nula

Uteute	C6 - Nível de intrusão da técnica (unid.: percentagem)					
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	0 - 20	nula	3	4	5	6
	20 - 40	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	60 - 80	-	-	-	nula	3
	80 - 100	-	-	-	-	nula

- Critério 7

Representativa	C7 - Disponibilidade de recursos (unid.: N/A)					
		Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Imediata	nula	1.75	3	5	6
	Elevada	-	nula	2.2	3.95	6
	Média	-	-	nula	3	3.95
	Baixa	-	-	-	nula	2
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C7 - Disponibilidade de recursos (unid.: N/A)					
		Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Imediata	nula	1	3	5	6
	Elevada	-	nula	1	3	5
	Média	-	-	nula	1	3
	Baixa	-	-	-	nula	1
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C7 - Disponibilidade de recursos (unid.: N/A)					
		Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Imediata	nula	2	3	5	6
	Elevada	-	nula	3	4	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	2
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C7 - Disponibilidade de recursos (unid.: N/A)					
		Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Imediata	nula	2	3	5	6
	Elevada	-	nula	2	4	6
	Média	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	nula	2
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Projetista	C7 - Disponibilidade de recursos (unid.: N/A)					
		Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Imediata	nula	3	4	5	6
	Elevada	-	nula	3	5	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	nula	2
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

Uteute	C7 - Disponibilidade de recursos (unid.: N/A)					
		Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa
	Imediata	nula	1	2	5	6
	Elevada	-	nula	2	5	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	nula

- Critério 8

Representativa	C8 - Segurança de circulação ferroviária (unid.: N/A)					
		Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
	Mt. Elevada	nula	1.6	4	5	6
	Elevada	-	nula	1.95	4.3	6
	Median. Elev.	-	-	nula	1.95	5
	Média	-	-	-	nula	2.5
	Baixa	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C8 - Segurança de circulação ferroviária (unid.: N/A)					
		Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
	Mt. Elevada	nula	1	4	5	6
	Elevada	-	nula	1	4	5
	Median. Elev.	-	-	nula	1	4
	Média	-	-	-	nula	1
	Baixa	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C8 - Segurança de circulação ferroviária (unid.: N/A)					
		Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
	Mt. Elevada	nula	3	5	5	6
	Elevada	-	nula	3	5	6
	Median. Elev.	-	-	nula	3	5
	Média	-	-	-	nula	4
	Baixa	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C8 - Segurança de circulação ferroviária (unid.: N/A)					
		Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
	Mt. Elevada	nula	1.5	4	5	6
	Elevada	-	nula	2	4.5	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	5
	Média	-	-	-	nula	2.5
	Baixa	-	-	-	-	nula

Projetista	C8 - Segurança de circulação ferroviária (unid.: N/A)					
		Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
	Mt. Elevada	nula	3	4	5	6
	Elevada	-	nula	3	5	6
	Median. Elev.	-	-	nula	3	5
	Média	-	-	-	nula	3
	Baixa	-	-	-	-	nula

Uteute	C8 - Segurança de circulação ferroviária (unid.: N/A)					
		Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa
	Mt. Elevada	nula	1	3	5	6
	Elevada	-	nula	2	4	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	5
	Média	-	-	-	nula	3
	Baixa	-	-	-	-	nula

• Critério 9

Representativa	C9 - Nível de conforto dos utentes (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	4	5	6
	Elevada	-	nula	1.95	3.95	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2.3	5
	Média	-	-	-	nula	3
	Baixa	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C9 - Nível de conforto dos utentes (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	4	5	6
	Elevada	-	nula	2	4	5
	Median. Elev.	-	-	nula	2	4
	Média	-	-	-	nula	2
	Baixa	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C9 - Nível de conforto dos utentes (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	4	5	6
	Elevada	-	nula	3	5	6
	Median. Elev.	-	-	nula	3	5
	Média	-	-	-	nula	4
	Baixa	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C9 - Nível de conforto dos utentes (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	4	5	6
	Elevada	-	nula	2	4	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2.5	5
	Média	-	-	-	nula	3
	Baixa	-	-	-	-	nula

Projetista	C9 - Nível de conforto dos utentes (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	
	Mt. Elevada	nula	3	4	5	6
	Elevada	-	nula	3	5	6
	Median. Elev.	-	-	nula	3	5
	Média	-	-	-	nula	3
	Baixa	-	-	-	-	nula

Utente	C9 - Nível de conforto dos utentes (unid.: N/A)					
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	
	Mt. Elevada	nula	1	3	4	6
	Elevada	-	nula	1	3	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	5
	Média	-	-	-	nula	3
	Baixa	-	-	-	-	nula

• Critério 10

Representativa	C10 - Velocidade de circulação (unid.: percentagem)					
	80 - 100	60 - 80	40 - 60	20 - 40	0 - 20	
	80 - 100	nula	3	4	5	6
	60 - 80	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	20 - 40	-	-	-	nula	4
	0 - 20	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C10 - Velocidade de circulação (unid.: percentagem)					
	80 - 100	60 - 80	40 - 60	20 - 40	0 - 20	
	80 - 100	nula	3	4	5	6
	60 - 80	-	nula	3	4	5
	40 - 60	-	-	nula	3	4
	20 - 40	-	-	-	nula	3
	0 - 20	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C10 - Velocidade de circulação (unid.: percentagem)					
	80 - 100	60 - 80	40 - 60	20 - 40	0 - 20	
	80 - 100	nula	3	4	5	6
	60 - 80	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	20 - 40	-	-	-	nula	5
	0 - 20	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C10 - Velocidade de circulação (unid.: percentagem)					
	80 - 100	60 - 80	40 - 60	20 - 40	0 - 20	
	80 - 100	nula	3	4	5	6
	60 - 80	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	20 - 40	-	-	-	nula	4
	0 - 20	-	-	-	-	nula

Projetista	C10 - Velocidade de circulação (unid.: percentagem)					
	80 - 100	60 - 80	40 - 60	20 - 40	0 - 20	
	80 - 100	nula	3	4	5	6
	60 - 80	-	nula	3	4	6
	40 - 60	-	-	nula	3	5
	20 - 40	-	-	-	nula	4
	0 - 20	-	-	-	-	nula

Utente	C10 - Velocidade de circulação (unid.: percentagem)					
	80 - 100	60 - 80	40 - 60	20 - 40	0 - 20	
	80 - 100	nula	2	5	6	6
	60 - 80	-	nula	3	6	6
	40 - 60	-	-	nula	4	5
	20 - 40	-	-	-	nula	4
	0 - 20	-	-	-	-	nula

• Critério 11

Representativa	C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente (unid.: N/A)						
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	3	4.2	5	6
	Elevada	-	nula	2	3	4	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	4	5
	Média	-	-	-	nula	1.95	3.4
	Baixa	-	-	-	-	nula	2.6
	Mt. Baixa	-	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente (unid.: N/A)						
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Mt. Elevada	nula	1	2	3	4	5
	Elevada	-	nula	1	2	3	4
	Median. Elev.	-	-	nula	1	2	3
	Média	-	-	-	nula	1	2
	Baixa	-	-	-	-	nula	1
	Mt. Baixa	-	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente (unid.: N/A)						
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	3	5	5	6
	Elevada	-	nula	2	3	4	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	4	5
	Média	-	-	-	nula	3	4
	Baixa	-	-	-	-	nula	4
	Mt. Baixa	-	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente (unid.: N/A)						
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	3	4	5	6
	Elevada	-	nula	2	3	4	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	4	5
	Média	-	-	-	nula	2	3.5
	Baixa	-	-	-	-	nula	2.5
	Mt. Baixa	-	-	-	-	-	nula

Projetista	C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente (unid.: N/A)						
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	3	4	5	6
	Elevada	-	nula	2	3	4	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	4	5
	Média	-	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	-	nula	4
	Mt. Baixa	-	-	-	-	-	nula

Utente	C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente (unid.: N/A)						
	Mt. Elevada	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	
	Mt. Elevada	nula	2	4	5	5	6
	Elevada	-	nula	2	4	4	6
	Median. Elev.	-	-	nula	2	4	5
	Média	-	-	-	nula	2	4
	Baixa	-	-	-	-	nula	3
	Mt. Baixa	-	-	-	-	-	nula

- Critério 12

Representativa	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
		Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	5.05	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3
	Elevada	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
		Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	2	4	6
	Média	-	nula	2	4
	Median. Elev.	-	-	nula	2
	Elevada	-	-	-	nula

Empreiteiro	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
		Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	4	6	6
	Média	-	nula	4	5
	Median. Elev.	-	-	nula	4
	Elevada	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
		Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	5	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3
	Elevada	-	-	-	nula

Projetista	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
		Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	5	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3
	Elevada	-	-	-	nula

Uteite	C12 - Volume de matéria-prima envolvida e energia associada (unid.: N/A)				
		Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Baixa	nula	3	4	6
	Média	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	nula	3
	Elevada	-	-	-	nula

- Critério 13

Representativa	C13 - Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Nula
	Elevada	nula	2.95	4.05	5	6
	Median. Elev.	-	nula	3.05	4.4	6
	Média	-	-	nula	3	4.95
	Baixa	-	-	-	nula	3.25
	Nula	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C13 - Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Nula
	Elevada	nula	2	3	4	5
	Median. Elev.	-	nula	2	3	4
	Média	-	-	nula	2	3
	Baixa	-	-	-	nula	2
	Nula	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C13 - Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Nula
	Elevada	nula	4	5	6	6
	Median. Elev.	-	nula	4	5	6
	Média	-	-	nula	4	6
	Baixa	-	-	-	nula	4
	Nula	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C13 - Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Nula
	Elevada	nula	3	4	5	6
	Median. Elev.	-	nula	3	4.5	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	nula	3.5
	Nula	-	-	-	-	nula

Projetista	C13 - Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Nula
	Elevada	nula	3	4	5	6
	Median. Elev.	-	nula	3	5	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	nula	3
	Nula	-	-	-	-	nula

Uteite	C13 - Tratamento e reaproveitamento de materiais retirados da via (unid.: N/A)					
		Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Nula
	Elevada	nula	1	3	5	6
	Median. Elev.	-	nula	2	3	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Baixa	-	-	-	nula	4
	Nula	-	-	-	-	nula

- Critério 14

Representativa	C14 - Emissão de ruído e vibrações (unid.: N/A)					
		Mt. Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Mt. Baixa	nula	2.7	3.7	5.05	6
	Baixa	-	nula	3	4.5	6
	Média	-	-	nula	2.95	4.5
	Median. Elev.	-	-	-	nula	2.95
	Elevada	-	-	-	-	nula

Gestor da Infraestrutura	C14 - Emissão de ruído e vibrações (unid.: N/A)					
		Mt. Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Mt. Baixa	nula	1	2	3	4
	Baixa	-	nula	1	2	3
	Média	-	-	nula	1	2
	Median. Elev.	-	-	-	nula	1
	Elevada	-	-	-	-	nula

Empreiteiro	C14 - Emissão de ruído e vibrações (unid.: N/A)					
		Mt. Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Mt. Baixa	nula	3	4	6	6
	Baixa	-	nula	3	5	6
	Média	-	-	nula	4	5
	Median. Elev.	-	-	-	nula	4
	Elevada	-	-	-	-	nula

Matriz MACBETH	C14 - Emissão de ruído e vibrações (unid.: N/A)					
		Mt. Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Mt. Baixa	nula	2.5	3.5	5	6
	Baixa	-	nula	3	4.5	6
	Média	-	-	nula	3	4.5
	Median. Elev.	-	-	-	nula	3
	Elevada	-	-	-	-	nula

Projetista	C14 - Emissão de ruído e vibrações (unid.: N/A)					
		Mt. Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Mt. Baixa	nula	3	4	5	6
	Baixa	-	nula	3	5	6
	Média	-	-	nula	3	5
	Median. Elev.	-	-	-	nula	3
	Elevada	-	-	-	-	nula

Uteite	C14 - Emissão de ruído e vibrações (unid.: N/A)					
		Mt. Baixa	Baixa	Média	Median. Elev.	Elevada
	Mt. Baixa	nula	4	5	6	6
	Baixa	-	nula	3	6	6
	Média	-	-	nula	3	6
	Median. Elev.	-	-	-	nula	3
	Elevada	-	-	-	-	nula

Abaixo encontram-se as respostas dos especialistas à Questão 3 e a ordenação de critérios para os três casos.

		Gestor da Infraestrutura	Projetista	Empreiteiro	Utente
O1	C1	6	6	6	6
	C2	5	6	5	5
	C3	5	6	5	6
	C4	4	5	5	3
O2	C5	5	4	5	6
	C6	3	5	4	4
	C7	3	4	4	4
O3	C8	6	5	3	6
	C9	5	3	3	6
	C10	5	4	4	6
	C11	3	4	3	5
O4	C12	2	3	3	4
	C13	2	4	4	5
	C14	3	3	3	6

Figura IV.1 – Respostas dos especialistas à Questão 3

Critério	Pontuação	Ranking	Critério	Pontuação	Ranking	Critério	Pontuação	Ranking
C1	6	1º	C1	6	1º	C1	6	1º
C3	5.45	2º	C3	5.5	2º	C3	5.45	2º
C8	5.3	3º	C2	5.25	3º	C2	5.35	3º
C10	5.05	4º	C5	5	4º	C8	5.3	4º
C2	5	5º	C8	5	4º	C10	5.05	5º
C5	5	5º	C10	4.75	5º	C5	4.9	6º
C9	4.75	6º	C4	4.25	6º	C9	4.75	7º
C4	4.45	7º	C9	4.25	6º	C4	4.45	8º
C6	4	8º	C6	4	7º	C6	3.85	9º
C7	4	8º	C7	3.75	8º	C11	3.8	10º
C11	3.8	9º	C11	3.75	8º	C13	3.7	11º
C13	3.7	10º	C13	3.75	8º	C7	3.65	12º
C12	3	11º	C14	3.75	8º	C14	3.3	13º
C14	3	11º	C12	3	9º	C12	2.9	14º

Figura IV.2 – Ordenação de critérios para os casos 1, 2 e 3, respetivamente

ANEXO V – Software M-MACBETH

- Propriedades dos critérios

Propriedades de C1 - Durabilidade

Nome: C1 - Durabilidade Nome abreviado: C1

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível quantitativo
1		22.5
2		17.5
3		12.5
4		7.5
5		2.5

Indicador: Número de anos

Abreviado: anos Unidade: anos

Propriedades de C2 - Resistência mecânica global da via

Nome: C2 - Resistência mecânica global da via Nome abreviado: C2

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Elevada	Elev.
2		Medianamente Elevada	Median. Elev.
3		Média	Média
4		Baixa	Baixa
5		Muito Baixa	Mt. Baixa

Propriedades de C3 - Estabilidade da superestrutura

Nome: C3 - Estabilidade da superestrutura Nome abreviado: C3

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Elevada	Elevada
2		Medianamente Elevada	Median. Elev.
3		Média	Média
4		Baixa	Baixa
5		Muito Baixa	Mt. Baixa

Propriedades de C4 - Condições de drenagem

Nome: C4 - Condições de drenagem Nome abreviado: C4

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Elevadas	Elevadas
2		Medianamente Elevadas	Median. Elev.
3		Médias	Médias
4		Baixas	Baixas
5		Muito Baixas	Mt. Baixas

Propriedades de C5 - Tempo de interdição

Nome: C5 - Tempo de interdição Nome abreviado: C5

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível quantitativo
1		2.5
2		7.5
3		12.5
4		17.5
5		30

Indicador: Número de períodos noturnos

Abreviado: Nr. períodos not Unidade: npn

Propriedades de C6 - Nível de intrusão da técnica

Nome: C6 - Nível de intrusão da técnica Nome abreviado: C6

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível quantitativo
1		10
2		30
3		50
4		70
5		90

Indicador: Percentagem

Abreviado: Percent. Unidade: %

Nome:

C7 - Disponibilidade de recursos

Nome abreviado:

C7

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☒ níveis qualitativos de performance:
☐ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Imediata	Imediata
2		Elevada	Elevada
3		Média	Média
4		Baixa	Baixa
5		Muito Baixa	Mt. Baixa

Nome:

C8 - Segurança de circulação ferroviária

Nome abreviado:

C8

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☒ níveis qualitativos de performance:
☐ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Muito Elevada	Mt. Elev.
2		Elevada	Elevada
3		Medianamente Elevada	Median. Elev.
4		Média	Média
5		Baixa	Baixa

Nome:

C9 - Nível de conforto dos utentes

Nome abreviado:

C9

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☒ níveis qualitativos de performance:
☐ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Muito Elevada	Mt. Elev.
2		Elevada	Elevada
3		Medianamente Elevada	Median. Elev.
4		Média	Média
5		Baixa	Baixa

Nome:

C10 - Velocidade de circulação

Nome abreviado:

C10

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☐ níveis qualitativos de performance:
☒ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível quantitativo	Indicador	Abreviado	Unidade
1		90	Percentagem		
2		70			
3		50			
4		30			
5		10			

Nome:

C11 - Valorização do aglomerado populacional envolvente

Nome abreviado:

C11

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☒ níveis qualitativos de performance:
☐ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Muito elevada	Mt. Elev.
2		Elevada	Elevada
3		Medianamente elevada	Median. Elev.
4		Média	Média
5		Baixa	Baixa
6		Muito Baixa	Mt. Baixa

Nome:

C12 - Volume de materiais envolvido

Nome abreviado:

C12

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☒ níveis qualitativos de performance:
☐ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Baixa	Baixa
2		Média	Média
3		Medianamente elevada	Median. Elev.
4		Elevada	Elevada

Propriedades de C13 - Reaproveitamento e tratamento de materiais retirados da via

Nome:

C13 - Reaproveitamento e tratamento de materiais retirados da via

Nome abreviado:

C13

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☒ níveis qualitativos de performance:
☐ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Elevada	Elevada
2		Medianamente Elevada	Median. Elev.
3		Média	Média
4		Baixa	Baixa
5		Nula	Nula

Propriedades de C14 - Emissão de ruído e vibrações

Nome:

C14 - Emissão de ruído e vibrações

Nome abreviado:

C14

Comentários:

Base de comparação:

☐ as opções
☐ as opções + 2 referências
☒ níveis qualitativos de performance:
☐ níveis quantitativos de performance:

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Nula	Nula
2		Muito baixa	Mt. Baixa
3		Baixa	Baixa
4		Média	Média
5		Elevada	Elevada

- Julgamentos MACBETH de diferença de atratividade entre níveis de performance nos critérios

C1 - Durabilidade

	22.5	17.5	12.5	7.5	2.5	Escala actual	
22.5	nula	fraca	forte	mt. forte	extrema	160	extrema mt. forte
17.5		nula	fraca	forte	mfort-extr	100	forte
12.5			nula	fraca	mt. forte	60	moderada
7.5				nula	fraca	0	fraca
2.5					nula	-60	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

C2 - Resistência mecânica global da via

	Elev.	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	Escala actual	
Elev.	nula	fraca	forte	mfort-extr	extrema	100	extrema mt. forte
Median. Elev.		nula	fraca	forte	extrema	50	forte
Média			nula	moderada	forte	0	moderada
Baixa				nula	frac-mod	-75	fraca
Mt. Baixa					nula	-125	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

C3 - Estabilidade da superestrutura

	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Mt. Baixa	Escala actual	
Elevada	nula	frac-mod	mod-fort	fort-mfort	extrema	100.00	extrema mt. forte
Median. Elev.		nula	moderada	mt. forte	extrema	66.67	forte
Média			nula	moderada	forte	0.00	moderada
Baixa				nula	moderada	-50.00	fraca
Mt. Baixa					nula	-100.00	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

C4 - Condições de drenagem

	Elevadas	Median. Elev.	Médias	Baixas	Mt. Baixas	Escala actual	
Elevadas	nula	fraca	mod-fort	fort-mfort	mfort-extr	100	extrema mt. forte
Median. Elev.		nula	frac-mod	forte	mt. forte	50	forte
Médias			nula	frac-mod	forte	0	moderada
Baixas				nula	moderada	-50	fraca
Mt. Baixas					nula	-125	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

C5 - Tempo de interdição

	2.5	7.5	12.5	17.5	30	Escala actual	
2.5	nula	frac-mod	mod-fort	fort-mfort	extrema	100	extrema mt. forte
7.5		nula	fraca	forte	mfort-extr	50	forte
12.5			nula	fraca	forte	0	moderada
17.5				nula	moderada	-50	fraca
30					nula	-125	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

C6 - Nivel de intrusão da técnica

	10	30	50	70	90	Escala actual	
10	nula	moderada	forte	mfort-extr	extrema	100.00	extrema mt. forte
30		nula	moderada	forte	extrema	50.00	forte
50			nula	moderada	mt. forte	0.00	moderada
70				nula	moderada	-50.00	fraca
90					nula	-116.67	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

C7 - Disponibilidade de recursos

	Imediata	Elevada	Média	Baixa	Mt. Baixa	Escala actual	
Imediata	nula	fraca	moderada	mt. forte	extrema	133.33	extrema mt. forte
Elevada		nula	fraca	forte	extrema	100.00	forte
Média			nula	moderada	forte	66.67	moderada
Baixa				nula	fraca	0.00	fraca
Mt. Baixa					nula	-50.00	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

C8 - Segurança de circulação ferroviária

	Mt. Elev.	Elevada	Median. Elev.	Média	Baixa	Escala actual	
Mt. Elev.	nula	mfrac-frac	forte	mt. forte	extrema	100	extrema mt. forte
Elevada		nula	fraca	fort-mfort	extrema	50	forte
Median. Elev.			nula	fraca	mt. forte	0	moderada
Média				nula	frac-mod	-50	fraca
Baixa					nula	-125	mt. fraca nula

Julgamentos consistentes

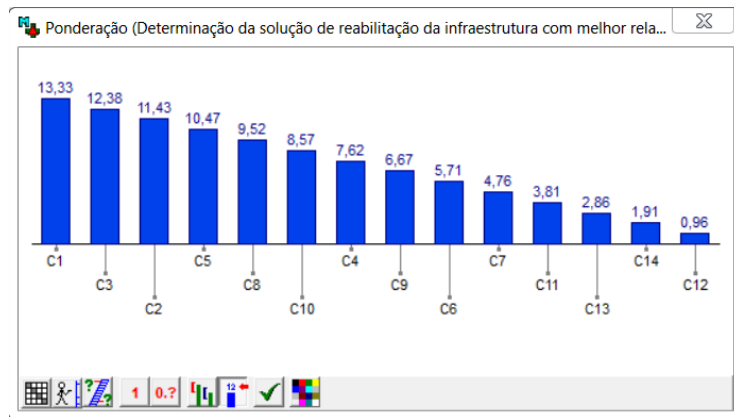
149

- Caso 2 – Matriz de ponderação e escala de pesos MACBETH

Ponderação (Determinação da solução de reabilitação da infraestrutura com melhor relação custo-benefício)

	[C1]	[C3]	[C2]	[C5]	[C8]	[C10]	[C4]	[C9]	[C6]	[C7]	[C11]	[C13]	[C14]	[C12]	[tudo inf.]	Escala actual	
[C1]	nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	13,33	extrema
[C3]		nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	12,38	mt. forte
[C2]			nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	11,43	moderada
[C5]				nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	10,47	fraca
[C8]					nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	9,52	mt. fraca
[C10]						nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	8,57	nula
[C4]							nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	7,62	
[C9]								nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	6,67	
[C6]									nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	5,71	
[C7]										nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	4,76	
[C11]											nula	positiva	positiva	positiva	positiva	3,81	
[C13]												nula	positiva	positiva	positiva	2,86	
[C14]													nula	positiva	positiva	1,91	
[C12]														nula	positiva	0,96	
[tudo inf.]															nula	0,00	

Julgamentos consistentes

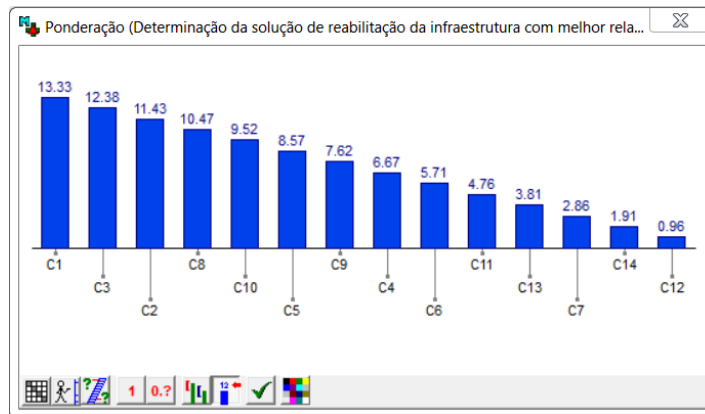


- Caso 3 – Matriz de ponderação e escala de pesos MACBETH

Ponderação (Determinação da solução de reabilitação da infraestrutura com melhor relação custo-benefício)

	[C1]	[C3]	[C2]	[C8]	[C10]	[C5]	[C9]	[C4]	[C6]	[C11]	[C13]	[C7]	[C14]	[C12]	[tudo inf.]	Escala actual	
[C1]	nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	13,33	extrema
[C3]		nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	12,38	mt. forte
[C2]			nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	11,43	moderada
[C8]				nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	10,47	fraca
[C10]					nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	9,52	mt. fraca
[C5]						nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	8,57	nula
[C9]							nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	7,62	
[C4]								nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	6,67	
[C6]									nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	5,71	
[C11]										nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	4,76	
[C13]											nula	positiva	positiva	positiva	positiva	3,81	
[C7]												nula	positiva	positiva	positiva	2,86	
[C14]													nula	positiva	positiva	1,91	
[C12]														nula	positiva	0,96	
[tudo inf.]															nula	0,00	

Julgamentos consistentes



- Caso 1 – Gráfico Custo/Benefício e Tabela de pontuação

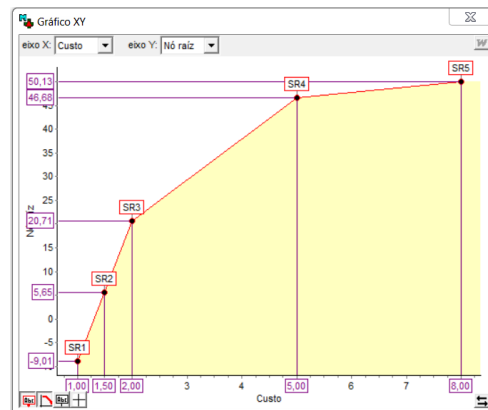
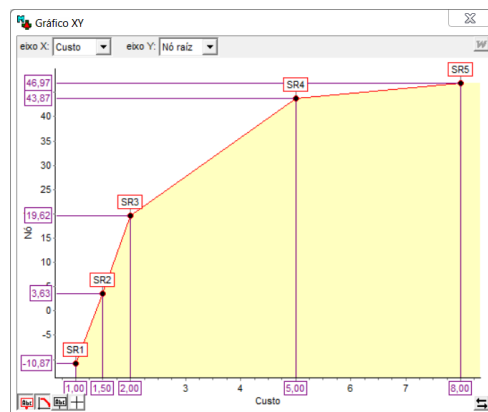


Tabela de pontuações

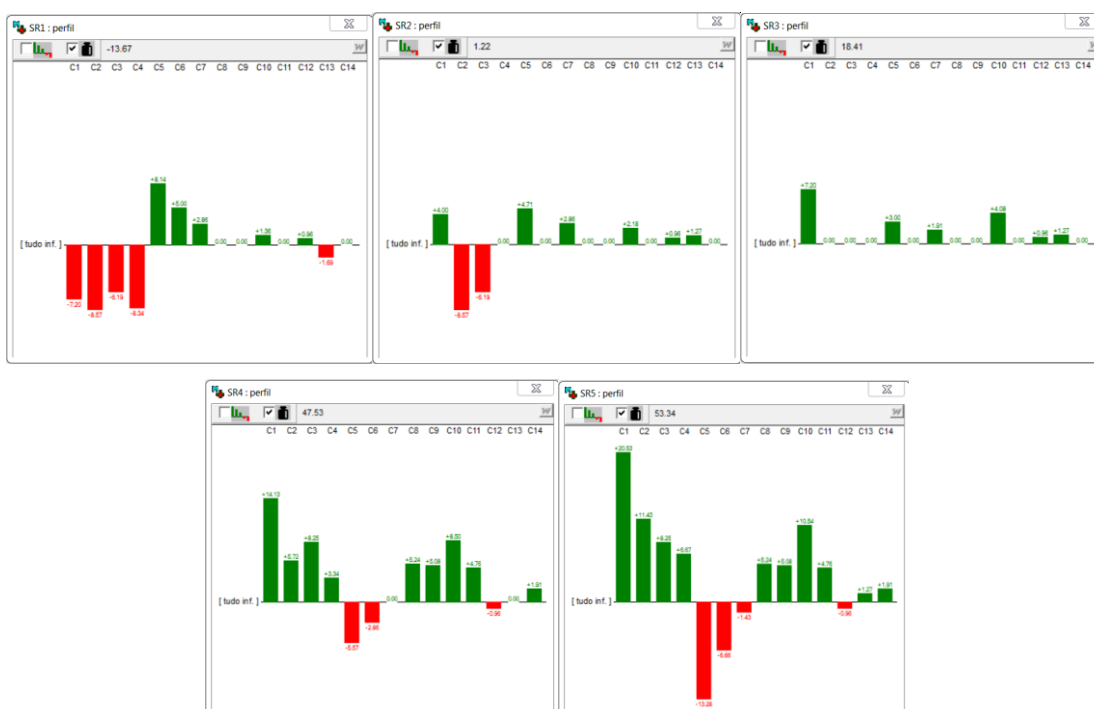
Opções	Global	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
SR1	-9,01	-54,00	-75,00	-50,00	-125,00	95,00	87,50	100,00	0,00	0,00	14,29	0,00	100,00	-44,44	0,00
SR2	5,65	30,00	-75,00	-50,00	0,00	55,00	0,00	100,00	0,00	0,00	22,86	0,00	100,00	33,33	0,00
SR3	20,71	54,00	0,00	0,00	0,00	35,00	0,00	66,67	0,00	0,00	42,86	0,00	100,00	33,33	0,00
SR4	46,68	106,00	50,00	66,67	50,00	-65,00	-50,00	0,00	50,00	66,67	89,29	100,00	-100,00	0,00	100,00
SR5	50,13	154,00	100,00	66,67	100,00	-155,00	-116,67	-50,00	50,00	66,67	110,72	100,00	-100,00	33,33	100,00
[tudo sup.]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
[tudo inf.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pesos :		0,1410	0,0897	0,1282	0,0641	0,0897	0,0513	0,0513	0,1153	0,0769	0,1025	0,0385	0,0129	0,0257	0,0129

- Caso 2 – Gráfico Custo/Benefício e Tabela de pontuação

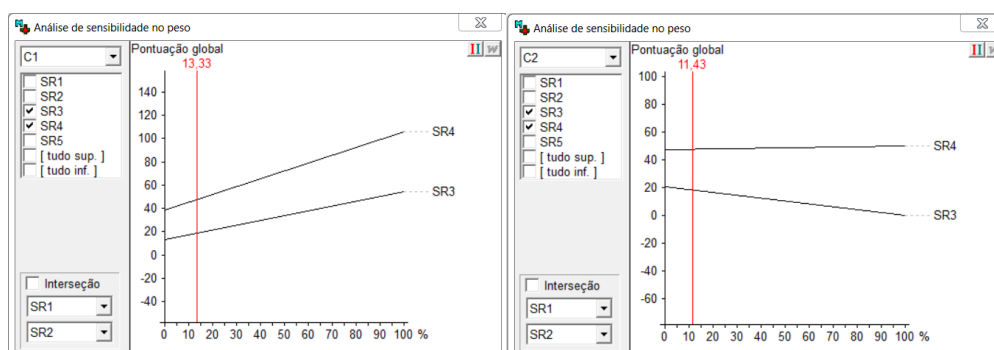


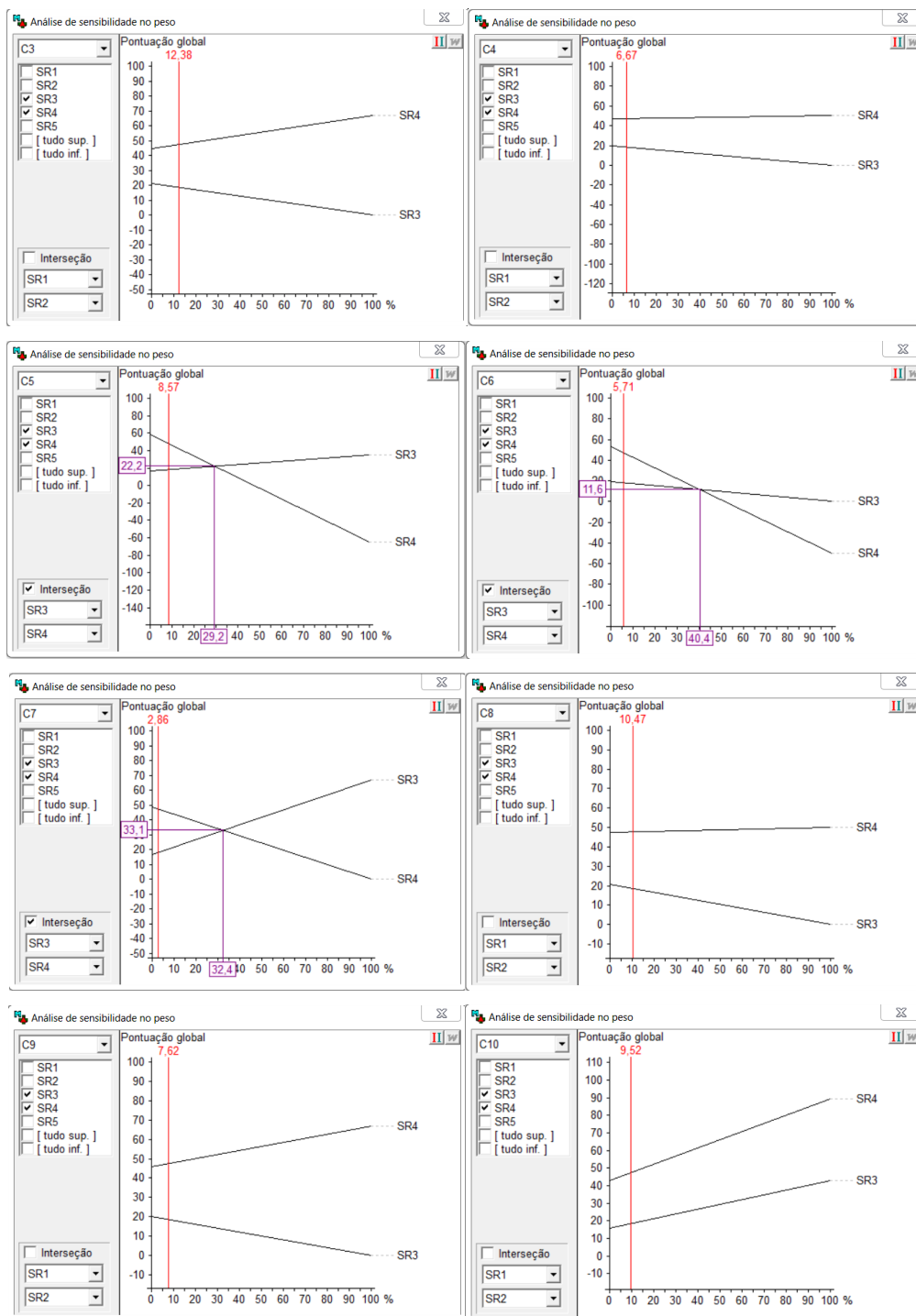
Opções	Global	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
SR1	-10,87	-54,00	-75,00	-50,00	-125,00	95,00	87,50	100,00	0,00	0,00	14,29	0,00	100,00	-44,44	0,00
SR2	3,63	30,00	-75,00	-50,00	0,00	55,00	0,00	100,00	0,00	0,00	22,86	0,00	100,00	33,33	0,00
SR3	19,62	54,00	0,00	0,00	0,00	35,00	0,00	66,67	0,00	0,00	42,86	0,00	100,00	33,33	0,00
SR4	43,87	106,00	50,00	66,67	50,00	-65,00	-50,00	0,00	50,00	66,67	89,29	100,00	-100,00	0,00	100,00
SR5	46,97	154,00	100,00	66,67	100,00	-155,00	-116,67	-50,00	50,00	66,67	110,72	100,00	-100,00	33,33	100,00
[tudo sup.]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
[tudo inf.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pesos :		0,1333	0,1143	0,1238	0,0762	0,1047	0,0571	0,0476	0,0952	0,0667	0,0857	0,0381	0,0096	0,0286	0,0191

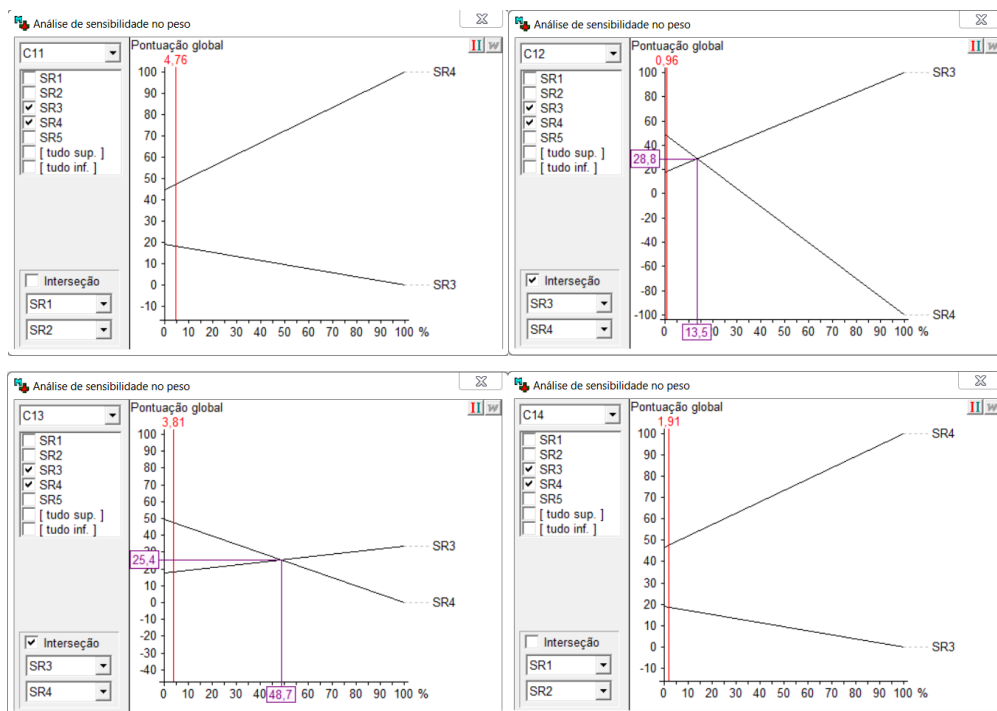
- Caso 3 – Perfil ponderado das alternativas



- Caso 3 – Análise de sensibilidade no peso (para todos os critérios)







ANEXO VI – Artigo realizado e apresentado no congresso internacional VETOMAC XIV (2018)

Apresenta-se um excerto de um artigo realizado e apresentado no âmbito da presente dissertação de mestrado para o VETOMAC XIV (2018) realizado no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. A integridade do documento encontra-se disponível em <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821112007>.

Multi-criteria analysis applied to railway rehabilitation

Vasco Caetano^{1,}, Paula Couto², Simona Fontul^{3,4}, and Maria João Falcão Silva²*

¹Nova University of Lisbon, Faculty of Science and Technology, Master in Civil Engineering (Structures), Caparica, Portugal

²National Laboratory for Civil Engineering, Department of Buildings, Assistant Researcher, Lisbon, Portugal

³National Laboratory for Civil Engineering, Department of Transportation, Assistant Researcher, Lisbon, Portugal

⁴Nova University of Lisbon, Faculty of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Invited Assistant Professor, Caparica, Portugal

*Corresponding author

Abstract. The railway infrastructure has very specific constraints that lead to the need of maximizing of the availability of infrastructure, with high levels of safety and quality, associated with an optimized cost. Having said this, it is essential to understand the methods behind the inspection and monitoring of existing railway infrastructures, the way of processing their data, as well as existing rehabilitation solutions. The present work begins with a brief description of the components of the ballast track and its operation, the different types of actions to which it is subjected to and the degradation mechanisms at the level of the ballast layer, substructure and transition zones, with particular attention being given to the latter since it is a section of the road with singularities that lead to a more pronounced degradation. The rehabilitation solutions addressed in this work start from a slight attack of the road (which can be considered as a small intervention) until a complete renovation of the road with reinforcement of the foundation. Based on the previously mentioned concepts, it is possible to define which variables, criteria

and respective weights are more important and influence the investment decision (on the rehabilitation of the railway infrastructure), thus enabling the methodologies of multi-criteria analysis applied to these variables. Currently, the economic factor is one of the variables that influence the most in decision making due to the lack of investment capacity. Mainly because of this factor and sometimes even without performing an analysis, one of the common practices is the restriction of circulation velocity rather than maintenance or rehabilitation measures. The case study used is an excerpt from a railroad in Portugal, where the entire described process will be applied and consequently analysed. Therefore, this work intends to contribute to a more efficient planning of the railway maintenance and rehabilitation measures, based on a better use of the data resulting from the track inspection, through a multi-criteria analysis.

ANEXO VII – Resumo para o congresso BE2018

Apresenta-se o resumo realizado para o Encontro Nacional de Betão Estrutural 2018 (BE2018), que se realizará no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Análise multicritério aplicada na reabilitação ferroviária

Caetano, Vasco ⁽¹⁾; Couto, Paula ⁽²⁾; Fontul, Simona ⁽³⁾; Falcão da Silva, Maria ⁽⁴⁾

- (1) Caetano, Vasco Fernando Rodrigues ; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal ; e-mail: v.caetano@campus.fct.unl.pt
- (2) Couto, Paula Margarida Carvalho Marques ; Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal ; e-mail: pcouto@lnec.pt
- (3) Fontul, Simona ; Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal; e-mail: simona@lnec.pt
- (4) Falcão da Silva, Maria João Serpa da Lança ; Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal; e-mail: mjoaofalcao@lnec.pt

Resumo

A infraestrutura ferroviária apresenta condicionantes muito próprias que conduzem à necessidade de otimização da infraestrutura, com elevados níveis de segurança e qualidade, associados a um custo mais vantajoso. Neste sentido, afigura-se como da maior relevância compreender *à priori* as metodologias de inspeção e monitorização das infraestruturas existentes, a forma de processamento dos seus dados, bem como as soluções de reabilitação disponíveis no mercado.

O presente trabalho tem início com uma breve descrição dos: i) constituintes da via balastrada e o seu funcionamento; ii) diferentes tipos de ações atuantes; iii) mecanismos de degradação a nível da camada de balastro, da subestrutura e das zonas de transição. As soluções de reabilitação abordadas neste trabalho contemplam desde um ligeiro ataque da via, até a uma renovação integral da infraestrutura com reforço da fundação. Tendo por base alguns dos conceitos apresentados no que se refere à Análise Multicritério, torna-se possível definir quais as variáveis, critérios e respetivos pesos, que mais importam e condicionam a decisão de investimento na reabilitação da infraestrutura ferroviária. Atualmente, o fator económico surge como uma das variáveis que apresentam elevado peso de decisão devido a se encontrar fortemente associado a uma falta de capacidade de investimento. A ausência de medidas de manutenção e de reabilitação tem um impacto negativo a nível da qualidade de serviço prestado aos utilizadores, da própria infraes-

trutura e do material circulante, resultando em custos de reabilitação maiores. Posteriormente é apresentado um caso de estudo correspondente a um trecho de uma infraestrutura ferroviária em Portugal, onde será aplicada toda a metodologia Multicritério e consequente análise.

O trabalho desenvolvido pretende ser um contributo para um planeamento mais eficiente das medidas de manutenção e reabilitação ferroviária, baseando-se num melhor aproveitamento dos dados resultantes da inspeção de via, mediante uma análise multicritério.